



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍ APLIKACE MĚŘENÍ  
ROZMĚRŮ OPTICKÝM SENZOREM A ROBOTICKÝM  
RAMENEM**

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A TEST APPLICATION FOR MEASURING DIMENSIONS WITH AN  
OPTICAL SENSOR AND A ROBOTIC ARM

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Kateřina Zagorská**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.**

**BRNO 2021**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Studentka: **Bc. Kateřina Zagorská**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Návrh a realizace testovací aplikace měření rozměrů optickým senzorem a robotickým ramenem

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je návrh přesného měření rozměrů testovaného dílu pomocí optického senzoru. V rámci práce bude proveden návrh postupu pomocí 6-osého robotického ramene s instalovaným optickým senzorem na jeho přírubě. Úkolem bude najít optimální variantu umožňující použít dostatečnou rychlost s ohledem na cyklus stroje při dodržení požadované přesnosti měření. Zadání DP je řešeno ve spolupráci se společností Elvac, a. s. v Ostravě.

### Cíle diplomové práce:

Analýza současného stavu pracoviště měření, popis řešení, výhody, nevýhody.

Rešerše metod a HW pro přesné optické měření a způsoby kalibrace vybraných typů součástí.

Systémový popis řešeného problému testovací aplikace měření rozměrů optickým senzorem a robotickým ramenem na laboratorním robotickém pracovišti, který je vybaven 6-osým robotem ABB. Návrh a vývoj testovací úlohy na robotickém pracovišti s využitím SW ABB RobotStudio: naučení TCP optického senzoru, naučení frame měřicího přípravku, definice trajektorií a optimalizace rychlostí pohybu

Kalibrace robotu a měřicího senzoru.

Posouzení vlivu rychlosti a orientace ramen robotu na přesnost a opakovatelnost měření.

Zhodnocení výsledků a doporučení pro praxi.

### Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIAM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIAM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na tvorbu měřicí aplikace pomocí optického senzoru a robotického ramene v programu RobotStudio. Součástí práce je rešerše v oblasti optického měření a kalibrace. Dále se pojednává o samotném postupu tvorby měřicí aplikace a nastínění problematiky kalibrace jednotlivých součástí. Práce je doplněna o ukázkou měření opakovatelnosti a popis možných chyb, které se při nesprávném nastavení robotu mohou vyskytnout.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with creation of a measuring application using optical sensor and robotic arm in the RobotStudio software. The literature review of the thesis describes the field of optical measuring and calibration. Furthermore, the thesis includes the process of creating a measuring application and outlining issue of calibration of individual parts. The work is supplemented by a demonstration of repeatability measurements and a description of possible errors that may occur if the robot is set incorrectly.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

optické měření, měřicí aplikace, optický senzor, kalibrace, robotické pracoviště

## **KEYWORDS**

optical measurement, measuring applications, optical sensor, calibration, robotic workplace



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZAGORSKÁ, Kateřina. *Návrh a realizace testovací aplikace měření rozměrů optickým senzorem a robotickým ramenem*. Brno, 2021.

Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132051>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Radek Knoflíček.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Radku Knoflíčkovi za veškerou pomoc, rady, připomínky a hlavně čas, který si na mne vždy našel. Dále bych chtěla poděkovat konzultantovi z firmy Elvac a.s. panu Ing. Martinu Halamovi za poskytnuté informace a cenné rady. Na závěr děkuji své rodině a příteli za podporu v průběhu psaní diplomové práce, ale i po dobu celého studia.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením pana doc. Dr. Ing. Radka Knoflíčka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 15. 5. 2021

.....

Zagorská Kateřina



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>MOTIVACE .....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>SPOLEČNOST ELVAC .....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU.....</b>	<b>21</b>
4.1	Dotykové měření.....	21
4.2	Optického měření.....	22
4.3	Zhodnocení metod měření .....	22
<b>5</b>	<b>PŘESNÉ OPTICKÉ MĚŘENÍ .....</b>	<b>25</b>
5.1	Metoda triangulace .....	25
5.1.1	Aktivní triangulace .....	25
5.1.2	Pasivní triangulace.....	26
5.1.3	Fokusovací techniky .....	27
5.1.4	Metoda „podoba ze stínování“ .....	28
5.2	Optická interferometrie .....	28
5.2.1	Interference .....	28
5.2.2	Interferometrie pracující s více vlnovými délkami.....	29
5.2.3	Holografická interferometrie .....	29
5.2.4	Skvrnová interferometrie .....	29
5.2.5	Interferometrie pracující s bílým světlem.....	30
5.3	Měření doby letu modulovaného světla.....	30
5.4	Příklady měřících přístrojů .....	31
5.4.1	Snímací prvky .....	31
5.4.2	Plošné (maticové) kamery .....	32
5.4.3	Řádkové kamery .....	32
5.4.4	Laser Tracker .....	32
5.4.5	Teodolit.....	33
5.4.6	Profilprojektory .....	34
5.4.7	Měřicí mikroskopy .....	34
5.4.8	Konfokální senzor.....	35
5.4.9	Laserové senzory (triangulační) .....	37
5.4.10	Laserový interferometr .....	38
5.5	Kalibrace.....	38
5.5.1	Kalibrace kamery .....	38
5.5.2	Metody kalibrace kamery .....	38
5.5.3	Příklady kalibrace kamery .....	40
5.5.4	Kalibrace senzoru .....	40
5.5.5	Příklady kalibrace senzorů.....	41
5.6	Srovnání .....	41
<b>6</b>	<b>SYSTÉMOVÝ POPIS ŘEŠENÉHO PROBLÉMU .....</b>	<b>43</b>
6.1	Systémový přístup.....	43
6.2	Řešený problém měřící aplikace.....	44
6.2.1	Postup .....	44
6.2.2	Cíle práce .....	44
6.2.3	Pracoviště jako celek .....	44
6.2.4	Měřicí aplikace .....	44

6.2.5	Zvolený robot .....	45
6.2.6	Řídící jednotka IRC5C Compact.....	47
6.2.7	Koncový efektor pro konfokální senzor .....	48
6.2.8	Konfokální senzor CL-P007 / CL-P030.....	48
6.2.9	Pracovní deska pro umístění měřeného dílu .....	53
6.2.10	Kalibrační značky.....	53
6.2.11	Testovací díl .....	53
<b>7</b>	<b>NÁVRH A VÝVOJ MĚŘICÍ APLIKACE POMOCÍ SW ROBOTSTUDIO..</b>	<b>55</b>
7.1	Souřadný systém robotu .....	55
7.2	Programování robotu .....	56
7.3	Program RobotStudio .....	56
7.3.1	Potřebné instrukce .....	56
7.3.2	Hlavní typy pohybů.....	59
7.4	Zadání měřicí aplikace .....	60
7.5	Realizace měřicí aplikace .....	61
7.5.1	Naučení TCP konfokálního senzoru .....	61
7.5.2	Naučení frame měřicího přípravku .....	62
7.5.3	Tvorba bodů pro kalibraci a měření .....	64
7.5.4	Definice trajektorií .....	65
7.5.5	Optimalizace rychlosti pohybů a drah.....	67
7.6	Vytvořené varianty měření .....	68
7.6.1	Doplnění simulace.....	69
<b>8</b>	<b>KALIBRACE ROBOTU A MĚŘICÍHO SENZORU .....</b>	<b>71</b>
8.1	Kalibrace robotu pomocí manuálu od ABB .....	71
8.1.1	Kalibrace os robotu .....	71
8.1.2	Manuální kalibrace .....	73
8.1.3	Absolutní kalibrace .....	73
8.2	Kalibrace konfokálního senzoru.....	74
8.3	Kalibrace soustavy robot a senzor .....	74
<b>9</b>	<b>PŘESNOST VERSUS OPAKOVATELNOST .....</b>	<b>77</b>
9.1	Přesnost a opakovatelnost.....	77
9.2	Metody eliminace chyby .....	78
9.2.1	Měření opakovatelnosti .....	79
9.2.2	Měření přesnosti.....	81
9.2.3	Možné vznikly chyb a jejich náprava.....	81
<b>10</b>	<b>ZHODNOCENÍ VARIANT MĚŘENÍ.....</b>	<b>83</b>
10.1	Porovnání variant měření .....	83
10.2	Zhodnocení dotykové metody vůči optické metodě.....	83
10.2.1	Propojení SW RobotStudio s kontrolérem robotu.....	84
10.2.2	Proces měření .....	84
10.3	Doporučení pro praxi.....	84
<b>11</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>87</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>89</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>97</b>
13.1	Seznam tabulek.....	97
13.2	Seznam obrázků.....	97
<b>14</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>101</b>

# 1 ÚVOD

Technika jde neustále vpřed ve všech možných směrech, a ani u aplikace, která bude v rámci práce řešena tomu není jinak. Měření a kontrola rozměrů nejčastěji spadá do oblasti dotykových senzorů, ale čím dál častěji se objevují bezdotykové metody měření. Bezdotyková metoda umožňuje všestranné využití v mnoha odvětvích od kontroly přítomnosti objektu na výrobních linkách, až po zmíněné měření rozměrů a kontroly polohy. Rozšíření možnosti měřit pomocí bezkontaktní optické metody je velmi žádaná. Také se nejedná pouze o optické senzory, ale jsou využívány i kamerové systémy či jiné optické přístroje.

Měření či kontrola objektů je možná díky správně použité optické metodě, která je doplněna přesnou konstrukcí daného optického systému. Proces probíhá povětšinou pomocí zdroje světla, přesně definované optiky a následným zpracování dat pomocí výpočetní techniky. Použitý zdroj světla závisí na metodě, která je pro danou problematiku nejvhodnější. Pokud se optické přístroje omezí pouze na optické senzory, u některých druhů se dá uvažovat i o měření pomocí robotu (robotického ramene). Tuto možnost poskytuje konfokální senzor vzhledem k jeho rozměrům a konstrukčnímu uspořádání. Díky této skutečnosti lze uvažovat o přeměřování a kontrole objektu přímo pomocí senzoru umístěného na koncový bod robotu. Takto zvolená kombinace umožňuje měření rozměrů v prostoru s přesným pohybem senzoru i pro objekty, se kterými není možno manipulovat pro jejich tvar nebo rozměry.

Předložená diplomová práce pojednává o této skutečnosti a zaměřuje se na tvorbu návrhu měřicí aplikace pomocí optického senzoru a robotického ramene v programu RobotStudio. Obsahuje popis optických metod spojených s konkrétními příklady přístrojů a jejich kalibrací. V rámci praktické části se práce zaměří na tvorbu několika variant měřicí aplikace. Dále bude řešena kalibrace robotu, senzoru a celkové sestavy. Součástí práce je také následný rozbor možností vhodného nastavení robotu pro zvýšení přesnosti výsledků. Nakonec bude vybrána nejvhodnější varianta a pro ucelení bude tato výsledná varianta porovnána s metodou dotykovou. Diplomová práce byla řešena ve spolupráci s firmou Elvac a.s.





## 2 MOTIVACE

Tato diplomová práce vznikla po konzultaci s firmou Elvac a.s., která na vybraných projektech spolupracuje se studenty. Motivací bylo především získat možnost zapojit se do tvorby reálných projektů a umět následně interpretovat dosažené dovednosti a rozvíjet osobnost i po stránce komunikační. Dalším aspektem bylo dozvědět se více o problematice, jenž je úzce spojena se studovaným oborem.

V rámci této spolupráce se jednalo o navrhování robotického programu pro měření pomocí optického senzoru. K tomu patří aplikování dosažených informací a znalostí v oblasti programování robotů a senzorických systémů, ale i zlepšení těchto dovedností společně s prací s informacemi.

Tato skutečnost umožnila poznat chod firmy, zlepšit komunikační vlastností a naučit se řešit vzniklé problémy, které tato doba podpořila. Také byly prohloubeny a uceleny vědomosti, potřebné k pochopení problematiky a vypracování závěrečné práce.



### 3 SPOLEČNOST ELVAC A.S.

Jedná se českou společnost založenou v roce 1991 pod původním jménem ELCOM s.r.o. V roce 2013 došlo ke spojení s tehdejšími dceřinými společnostmi (ELVAC IPC s.r.o. a ELVAC AUTOMATION s.r.o.) do jedné, která se doposud prezentuje pod jménem ELVAC a.s. (viz obr. 1). Společnost poskytuje obchodně-technické a inženýrsko-dodavatelské služby v oblasti průmyslové automatizace a robotiky, průmyslových a speciálních PC systémů, silnoproudé elektroniky a jednoúčelových strojů. Vytváří a dodává ekologické systémy pro čištění ovzduší a měří jeho kvalitu. [1]

Společnost se zaměřuje na malosériovou výrobu a poskytuje řešení založené na jejich vlastním výzkumu a vývoji nových produktů. V tomto ohledu také firma spolupracuje i s různými dodavateli. Produkty lze nalézt i na zahraničních trzích (Polsko, Rumunsko, Bulharsko, Čína, USA a další). [1]



Obr. 1) Logo společnosti Elvac a.s. [1]



## 4 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

Laboratorní robotické pracoviště firmy Elvac a.s. slouží primárně k aplikacím, které jsou teprve ve vývoji, nebo jde o testovací aplikace různých produktů. Jedná se například o aplikace pro měření, testování kamer strojového vidění, či předváděcí akce na veletrzích. Především jsou to aplikace pro málo rozměrné díly a nástroje o nízkých hmotnostech. Pracoviště je vcelku malé a kompaktní.

Celkový koncept pracoviště není složitý, aby byla manipulace s ním jednoduchá. V pracovním prostoru – buňce se nachází místo na montáž robotu, aby měl co největší prostor pro pohyb ve všech osách. Jeho řídicí systém společně s kabeláží je umístěn do zakrytovaného prostoru pod pracovní deskou buňky. K řídicímu systému spadá také Teach Pendant, pomocí kterého lze provádět rychlé manipulace s robotem. Pracovní deska je uzpůsobena pro upínání více přípravků.

Společnost se nyní zabývá otázkou měření bezdotykovým způsobem oproti dotykovému. Následovat bude seznámení se s oběma metodami měření.

### 4.1 Dotykové měření

Na pracovišti byla před zahájením dalšího projektu testována aplikace dotykového měření. Jednalo se o testování dotykového senzoru pro následné zprovoznění na dotykové měření světlometů na jiném pracovišti u zákazníka. Senzor použitý pro testování je od výrobce Keyence s názvem GT2-P12 (viz obr. 2). Senzor používá nového typu detekování. Tento princip se nazývá Scale Shot System II, který si na účet připisuje již zmíněný výrobce Keyence. V senzoru je zabudována stupnice absolutních hodnot, která je zaznamenávána senzorem CMOS (viz kapitola 5). Při dotyku se tato stupnice pohybuje a senzor detekuje změny hodnot. Díky tomuto principu je zajištěna vyšší přesnost měření. Tato přesnost se pohybuje v jednotkách mikrometrů a to konkrétně 2  $\mu\text{m}$ , jak udává výrobce. Senzor disponuje také odolností vůči nečistotám a oleji, což je žádoucí. Tento typ senzoru jde aplikovat na přírubu robotu, díky jeho malým rozměrům. [2]



Obr. 2) Robot s dotykovým senzorem GT2-P12

Ceny těchto senzorů a jejich příslušenství, tj. senzor, kabel, zesilovač a komunikační jednotka se pohybují cca od 800 do 1 000 eur což je v přepočtu od 20 835 do 26 051 Kč.

Aplikace dotykového měření spočívá v kontaktu mezi senzorem a měřeným bodem na objektu. Senzor najede do zvoleného bodu a pomocí kontaktu se „vytvoří“ naměřená hodnota. Body určené k měření musí být rozšířeny o body nájezdu a výjezdu v dostatečné vzdálenosti od měřeného objektu. Při této metodě je velmi důležité zvolit vhodnou rychlost nájezdu a výjezdu. Pohyby musí být plynulé a dostatečně pomalé, aby nedošlo ke kolizi, nárazu nebo deformaci senzoru, popřípadě měřeného objektu a současně proběhlo měření bezchybně. Při najetí do bodu dochází k ustálení senzoru s jistou časovou prodlevou. Na tyto aspekty se kladou velké požadavky a vysoká přesnost měření je na úkor rychlosti měření. Nepříznivým vlivem může být opotřebení senzoru po delší době používání. Avšak v jistých měřicích aplikacích je dotykový senzor nepostradatelný, především ve strojírenských aplikacích, kde může docházet k znečištění měřeného objektu. [3]

## 4.2 Optického měření

V současnosti se firma Elvac a.s. zabývá měřicí aplikací pomocí optického senzoru, konkrétně konfokálního. Senzor pro tuto aplikaci volila firma opět od výrobce Keyence. Vybraným senzorem bude tentokrát konfokální z řady CL-3000. Taktéž i zde je výrobcem zhotovená konstrukce uzpůsobena pro uchycení na přírubu robotu.

Systém měření zde funguje podobně, jako u předešlé metody se zásadním rozdílem, senzor při měření pouze najíždí nad měřený bod. Jedná se o bezkontaktní metodu měření využívající vícebarevného světla. Podrobné specifikování funkce konfokálního senzoru bude uvedeno dále v práci.

Bezdotykové měření má oproti dotykovému měření výhodu především v rychlosti. Při vhodné volbě bodů lze snížit dobu měření. Využívá se například u kontrolních procesů, u kterých jde především o rychlost a je dostačující relativní měření. Dokáže měřit předměty, na které dotykové měření využít nelze, příkladem mohou být křehké povrchy, technické povrchy sestavené z mikro rozměrných čoček, nebo součástky paměťových zařízení aj., ve kterých je potřeba rozpoznat rozměrové rozdíly a nelze použít dotyku. Díky bezkontaktnosti nedochází k opotřebení senzoru a je menší pravděpodobnost kolize. Avšak bezdotykové měření se nejlépe uplatní v čistých prostředích, kde nedochází k zanesení měřeného objektu. V případě nečistot na objektu dojde ke špatnému naměření hodnot a tím i k částečnému znehodnocení výsledků. Toto však neplatí pro všechny bezdotykové optické senzory. Další nevýhodou může být cena, která je oproti kontaktnímu měření vyšší. Pro kompletní sestavu konfokálního senzoru s příslušenstvím, tj. senzor, optický kabel, řídicí jednotka, software, support se cena pohybuje kolem cca 9 000 eur (234 527 Kč). [3]

## 4.3 Zhodnocení metod měření

Nyní zde byly popsány dvě metody měření a zhodnoceny jejich vlastnosti. Obě metody jsou velkým přínosem ve svém oboru. Vzhledem k požadavkům na vyšší rychlost a přesnost měření je volena právě bezdotyková metoda. Vliv na tuto volbu má také i delší mechanická výdrž senzoru a uplatnění v aplikacích, které dotykovou metodou nelze provést. Tímto se zajistí větší spektrum možných využití. A tak se i navzdory vyšší ceně tato metoda stává atraktivní pro zákazníky.

Diplomová práce se dále bude zabývat bezdotykovou metodou měření pomocí optického senzoru.

### Zajímavost

Před začátkem projektu sloužilo pracoviště jako ukázkový projekt na veletrh Ampér, (viz obr. 3). Zde se jednalo o systém strojového vidění. Kamera komunikovala s robotem a posílala přesné souřadnice polohy objektu, robot dojel na požadované místo, předmět uchopil pomocí přísavky na přírubě a umístil jej do připraveného lůžka.



Obr. 3) Robotické pracoviště





## 5 PŘESNÉ OPTICKÉ MĚŘENÍ

Optické měření spadá mezi nejpřesnější metody měření. V současné době dochází v této disciplíně k rozmachu. Optické měření se může dělit do několika typů podle použitého přístroje. [4] [5] [6]

- Optické senzory – laserové senzory, konfokální senzory, interferometry atd;
- Kamery strojového vidění – řádkové kamery, maticové kamery;
- Optické systémy – profilprojektor, měřicí mikroskopy, video měřicí systémy atd.

Optické senzory v této problematice fungují na principu měření vzdálenosti, nebo i tloušťky objektu. Jedná se o nejnovější metodu měření, která spadá do nejpřesnějších měřících metod v současnosti. Lze ji využít i pro potřeby měření a kontrolu rozměrů předmětů. [5] [6]

Aby byl lépe pochopen koncept měření dle zadání diplomové práce, je vhodné seznámit se dalšími možnostmi optického měření pomocí různých metod a přístrojů. Do těchto metod spadá i metoda strojového vidění. Tato problematika se velmi rychle rozvíjí kvůli snaze zajistit přesné, rychlé ale především bezkontaktní měření. [7] [8]

U většiny měřících zařízení (krom optických senzorů) se převádí 3D předmět na 2D obraz, to znamená, že se v procesu ztratí informace o souřadnici. Člověk neztrácí přehled o 3D informaci, na základě znalosti souvislostí ve světě a možnosti „domyšlení“ rozměru díky stínu, pohybu předmětu nebo paměti. Dalším aspektem napomáhajícím k vidění trojrozměrně jsou lidské oči. Vzhledem k tomuto aspektu je třeba napodobit lidský zrak v rámci problematiky strojového vidění. [7] [8]

Tyto základní metody se dají využít pro různé aplikace, ale je třeba dbát na potřebné specifikace snímaného objektu a okolního prostředí jako jsou velikost objektu, vzdálenost od měřícího přístroje, barva, drsnost povrchu atd. Dalšími důležitými aspekty jsou čas měření a finanční stránka, ty se navzájem doplňují. Je třeba uvažovat, zda se technologie pro daný účel vyplatí. [7] [8]

Optické měření jsou založené na principu tří metod, které budou dále rozebrány v práci. [7] [8]

- metoda triangulace;
- metoda optické interferometrie;
- metoda měření doby letu modulovaného světla.

### 5.1 Metoda triangulace

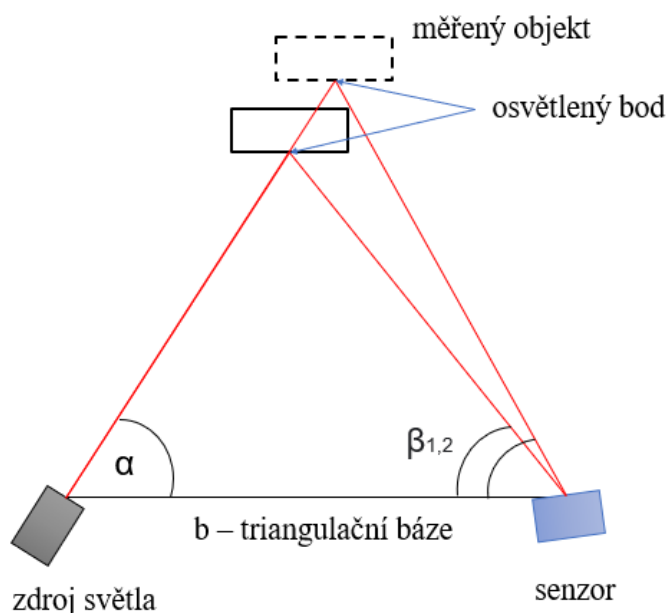
Mezi nejvíce využívanou metodu optického měření se považuje metoda triangulace, pod kterou spadají ještě další postupy. [8]

#### 5.1.1 Aktivní triangulace

Principiálně metoda spočívá v současném nasvícení objektu zdrojem světla a snímání CCD nebo CMOS senzorem. Měření je uzpůsobeno v tzv. triangulačním trojúhelníku, v jehož prvním vrcholu je světlený zdroj a na druhém vrcholu pod stále stejným úhlem senzor (kamera v případě strojového vidění), dohromady tvoří triangulační bázi. Třetím vrcholem je snímaný objekt, od něhož se světlo odráží a dopadá na senzor (viz obr. 4). Úhel mezi bodem dopadu

světla na objekt a kamery (senzoru) je klíčový. Při využití kamery pro strojové vidění lze podle velikosti tohoto úhlu vydedukovat „chybějící“ souřadnice  $z$ . [8]

V případě senzoru se vysílaný světelný paprsek odrazí od předmětu měření pod určitým úhlem a dopadá na přijímací plochu. Podle úhlu odrazu a polohy dopadu odraženého paprsku na plochu se určuje vzdálenost předmětu. Některé senzory mohou být vybaveny čočkou či řadou čoček před senzorem. Na čočku dopadá odražený paprsek s konkrétním úhlem a po průchodu je za čočkou vyhodnocen senzorem. [9] [10]



Obr. 4) Princip triangulace [11]

Na obrázku je naznačen měřený objekt ve dvou vzdálenostech a klíčové úhly pro měření. Úhel  $\alpha$  je stálý úhel mezi zdrojem světla a senzorem. Úhly  $\beta_1$  a  $\beta_2$  jsou úhly vzniklé při odražení a dopadu světla na senzor (detektor) a jsou potřebné k vyhodnocení vzdálenosti měřeného objektu. Ke snímání objektu je využíván buď světelný paprsek (1D), světelný pruh (2D) nebo světelný svazek (3D). [8]

### 5.1.2 Pasivní triangulace

Tato metoda je využívána převážně pro kamery strojového vidění. Pasivní triangulace nepočítá s geometrickým uspořádáním osvětlení (nepoužívá se osvětlení), namísto toho se používají kamery s danou orientací, nebo se samokalibrací, či jedna kamera s možností napolohování a samokalibrací. Počet kamer závisí na druhu použití. Pokud se jedná o neměnné prostředí (statické) dává se přednost jedné kameře s možností polohování. U pohyblivého prostoru se používá více kamer. Pro správné vyhodnocení objektu je potřeba pořídit nejméně dva snímky z různých pohledů nebo z jiné scény. [8]

Samokalibrací se dokáže určit relativní poloha kamery prostřednictvím pořízených snímků z kamer (kamery). Je žádoucí, před spuštěním procesu, vložit do prostoru kalibrační předmět se známými rozměry a vzory na základě, kterého se pak z obrazu zjistí potřebné parametry pro další postup. [8]

### Stereovidění

Jako další metodu spadající pod pasivní triangulaci se považuje metoda využívající dvou kamer stereovidění. Ta vychází z funkce lidských očí, které dokáží vidět předměty prostorově, na základě protnutí sdružených zorných paprsků v určitém bodě v prostoru. V technice dva CCD senzory s rovnoběžnými optickými osami nahrazují lidské oči. Každý senzor pořídí jeden obraz a vzniká stereoskopický snímek. Pro základní případ je brán v potaz schématický obrázek, ve kterém směřují osy kamer ve směru osy  $z$  a obrazové roviny kamer jsou ve vzdálenosti  $z = 0$  (viz obr. 5). Z obrázku lze vyčíst úhel  $\gamma$  svíraný sdruženými paprsky s bodem měření P. [8] [11]

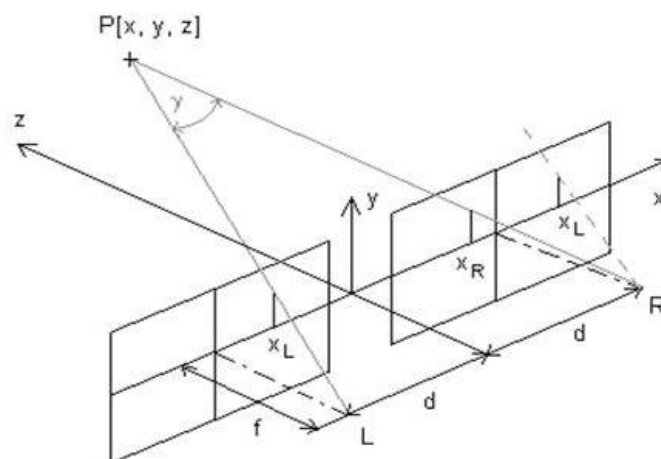
$\gamma$  ... úhel svíraný sdruženými paprsky (úhlová paralaxa)

P ... měřený bod

L, R ... ohniska kamer

d ... vzdálenost optických kamer od osy  $z$

$x_L, x_R$  ... souřadnice bodu P



Obr. 5) Princip stereovidění [12]

### **5.1.3 Fokusovací techniky**

Další měřicí metodou jsou fokusovací techniky, které se dělí na konfokální metodu (mikroskopii), kontrolované fokusování a metodu rozfokusování. V práci bude dále uvedena pouze metoda konfokální. [8]

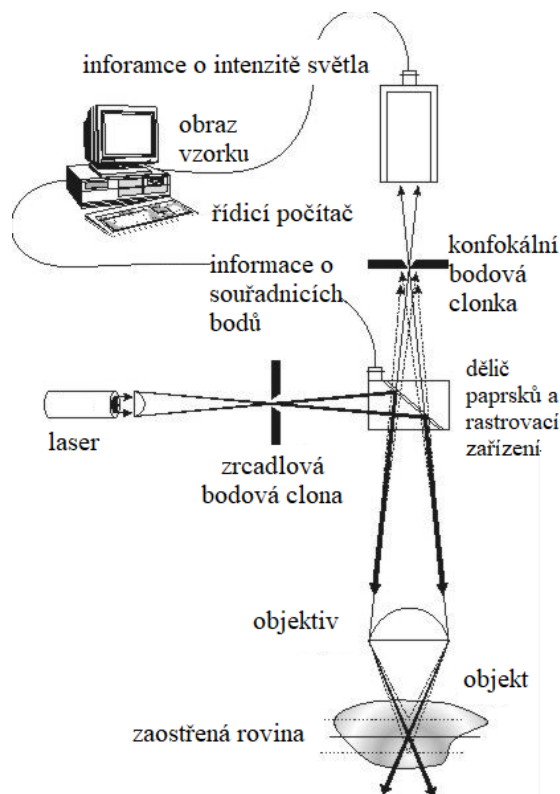
#### Konfokální metoda

Konfokální metoda využívá soustavu čoček pro zaostření polychromatického bílého světla na měřený povrch. Při osvětlení čoček vznikají body v místě ohniska. Pouze body, které jsou v ohniskové rovině osvětlené, může senzor zachytit. Pokud je světlený bod přímo v ohnisku (tzv. focal point) vychází z něho ostrý obraz, v případě jiného bodu je obraz rozostřený. K odstranění neostrého obrazu se používá bodová clona. Využívá se především při měření v malé vzdálenosti, hloubky a nerovnosti (řádově mm). [13] [14] [15]

#### Konfokální mikroskopie

Princip mikroskopie (viz obr. 6) je podobný jako u konfokální metody se stejnou výhodou zaostření konkrétního snímaného bodu. Světelný paprsek v podobě laseru dopadá na zrcadlovou bodovou clonku, která se následně odrazí od děliče a promítne se na vzorek přes objektiv. Odražené světlo od objektu prochází zpět přes objektiv. V rámci zpětného záření

vzniká další obraz bodové clonky procházející přes dělič paprsků, kde je fotonásobičem lokalizován. V těchto místech se nachází další konfokální bodová clonka, ta má za úkol blokovat nezaostřené záření. Obraz roviny se dostane pomocí jejího rastrování, tudíž obraz se nezíská najednou, ale postupně bod po bodu. Počítač při rastrování zaznamenává intenzitu světla i informaci o souřadnicích  $x$ ,  $y$  měřeného bodu objektu. Přesně definované posuny v ose  $z$  zajistí i jednotlivé optické řezy. [16] [17]



Obr. 6) Princip konfokálního mikroskopu [16]

#### 5.1.4 Metoda „podoba ze stínování“

Tato metoda triangulace spočívá ve vypočtení 3D tvaru z normály povrchových elementů, které se získávají ze známých faktorů, jako jsou: pozice kamery, zdrojů světla, stínů, odlesků a ozáření. Povrch tělesa se osvětluje laserovým paprskem s náklonem potřebným k nasvícení celé plochy. [8] [11]

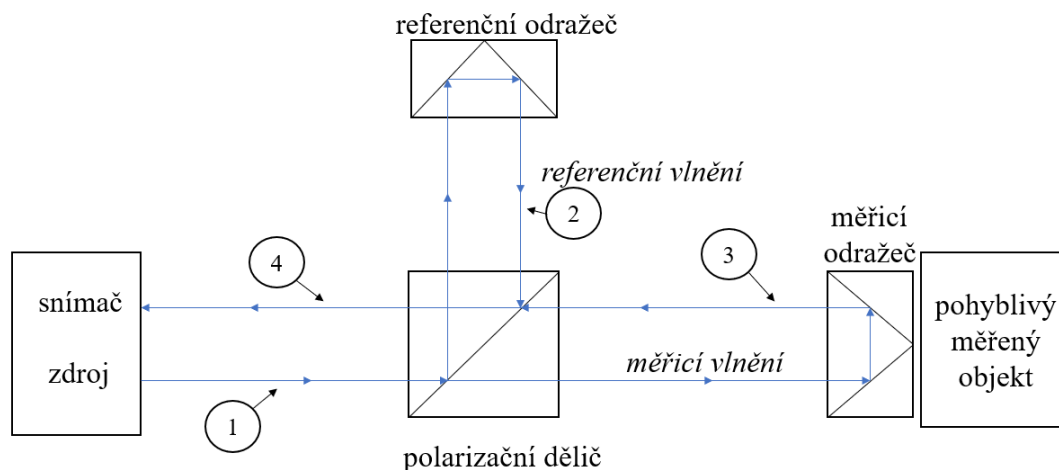
## 5.2 Optická interferometrie

Metoda funguje na vysílání koherentního záření a měření doby jeho letu. Není možné měřit absolutní vzdálenost, proto se měří rozdíl vzdálenosti vyplývající z fázového rozdílu. [8] [18]

### 5.2.1 Interference

Interference je proces, u kterého dochází ke skládání částí vlnění (elektrického a magnetického pole) ve zvoleném místě (viz obr. 7). Vznikají tzv. interferenční struktury, které se projevují u monochromatického světla světlými a tmavými proužky, nebo duhovými barvami u bílého světla. Důležitou vlastností světelného paprsku je jeho uspořádanost (koherentnost), aby bylo dosaženo vzájemného složení dvou a více paprsků. U přirozeného zdroje jsou vlastnosti světla stálé, a tudíž může interference probíhat pouze na malé vzdálenosti. U monochromatického uměle tvořeného světla (laseru) lze interferenci pozorovat až do několika metrů. [19]

Ze zdroje vychází paprsek světla (v tomto případě laseru) (1) a dopadá na polarizační dělič, kde je rozdělen na dva paprsky – referenční (2) a měřicí (3). Paprsky jsou po odrazu poslány zpět. V místě polarizačního děliče opět interferují do jednoho paprsku (4) a ten pak dopadá na senzor (detektor). [18]



Obr. 7) Michelsonův interferometr [18]

Mezi nejčastěji využívané interferometry spadají, Sagnacův, Fabry-Peretův, Mach-Zehnderův a Michelsonův. Pod metodu optické interferometrie spadají další metody, které budou dále rozebrány v práci. [8]

### 5.2.2 Interferometrie pracující s více vlnovými délkami

Technika fungující na principu superpozice dvou téměř totožných vlnových délek, při kterých vzniknou uměle vytvořené frekvence v řádu mega až gigahertzů. V závislosti na frekvenci se určuje, do jaké vzdálenosti se dá měřit bez nejasností. Pro ideální podmínky se vzdálenost měření pohybuje až do několika desítek metrů s přesností v nanometrech. [8]

### 5.2.3 Holografická interferometrie

Tento druh metody interferometrie dokáže měřit povrchové deformace měřených objektů. Měří se převážně tepelně nebo mechanicky namáhané objekty, objekty podléhající vibracím nebo objekty se změnou polohy. Může být využívána k vyšetřování dynamických jevů a je díky rozmanitosti měření vcelku univerzální. [8]

Metoda spočívá v porovnávání dvou světelných vln s tím rozdílem, že se jedná o vlny puštěné v rozdílném čase. Jako první je vytvořen obraz původního objektu. Pak je spuštěno zaznamenávané namáhání objektu, kde dochází ke změně fáze. Po dokončení měření se promítne původní obraz na deformovaný objekt v místech, kde se deformace projevila se vytvoří interferenční struktura. Výsledkem celého měření je charakterizace vzniklého namáhání. [8] [20]

### 5.2.4 Skvrnová interferometrie

Metoda pro přesné měření deformací. Výstupem jsou skvrny, které vznikají odražením světla od drsného povrchu měřeného objektu. Na detektoru spolu interferují vlnoplochy odražené od částí povrchu objektu a vyhodnocují skvrnový vzor. Tento jeden vyslaný referenční paprsek tvořící vzor se smísí s druhým paprskem tvořící další skvrnový vzor a dohromady dají vznik skvrnovému interferogramu. Pokud dochází k deformaci objektu v průběhu procesu, je pořízen

další skvrnový interferogram pro porovnání s původním. Obraz tvoří černé proužky a mezi nimi jsou bílé mezery s určenou hodnotou (např.  $\lambda/2$ ). [8] [21]

### 5.2.5 Interferometrie pracující s bílým světlem

Technologie pro měření objektů s drsným povrchem i hladkým povrchem s vysokým stupněm přesnosti. K měření se používá principu Michelsonova interferometru, vzhledem k širokému spektru zdroje světla. Vysílačem je zdroj bílého světla a přijímačem je maticová kamera s mnohonásobnou detekcí. [8] [22]

Měřený předmět se posouvá v jednom směru a současně je hloubkově skenován. Na určeném prostoru je takto měřen rozdíl optických drah mezi referenčním vlněním a měřicím vlněním. Podle intenzity světla dopadajícího na povrch v určité poloze objektu se vytvoří interferogram (viz obr. 8). [8] [22]



Obr. 8) Interferogram [22]

### 5.3 Měření doby letu modulovaného světla

Metoda měření doby letu vychází ze stejného principu jako interferometrie, avšak používá se na místech, kde není třeba vysokých požadavků na rozlišení, kvůli její nepřesnosti. Vzdálenost měřeného objektu se určuje dobou letu světelného paprsku, kam spadá jeho vysílání, odražení od měřeného objektu a následný dopad paprsku a jeho zachycení detektorem (senzorem). Toto vyplývá ze vztahu: [8]

$$z = c * \frac{\tau}{2} \quad (1)$$

Kde:  $z$  ... vzdálenost měřeného objektu

$c$  ... rychlost světla

$\tau$  ... doba od vyslání světelného paprsku do jeho dopadu na přijímač

K chybě a k časovému zpoždění dochází v důsledku vysokofrekvenční elektronické části přístroje. Je třeba využít mechanické kalibrace, aby byla chyba minimalizována. Uvažují se velké nároky na přesnost přístroje, kvůli vysoké rychlosti světla. [7]

Metodu lze rozdělit do tří druhů modulace signálů: [7]

- Pulsní modulace
- Spojitá modulace
  - Amplitudová – změna amplitudy nosného kmotočtu
  - Frekvenční – změna kmotočtu nosné vlny
  - Fázová – změna fáze nosné vlny
- Pseudonáhodná modulace (pseudo-noise modulation): kombinace několika vlastností

V této části kapitoly byly shrnuty metody optického měření, které se v současnosti používají. V další části kapitoly se práce bude zabývat konkrétními příklady a kalibrací přístrojů pro optické měření.

## 5.4 Příklady měřících přístrojů

V následujících podkapitolách bude uvedeno několik příkladů senzorů, kamer a dalších optických přístrojů.

### 5.4.1 Snímací prvky

Prvním a nejdůležitějším členem optického měření je snímací prvek zabudovaný v systému přístroje. Používají se dva druhy snímacích prvků – CCD a CMOS. Oba fungují na stejném základním principu, převodu světelné energie (světla) na elektrickou energii. [23]

#### CCD (Charge Coupled Device)

Senzor využívá tzv. fotoefektu, který spočívá v přemístění elektronů do excitovaného stavu pomocí nárazu fotonu (částice světla). Foton přitom odevzdá energii elektronu. CCD senzor je složen z velkého množství samostatných světlo citlivých plošek křemíku – buněk a dvou elektrod. Při nasvícení se v buňkách uvolňují elektrony (posléze tvořící náboj) a zůstávají po nich volný prostor – díry. Počet uvolněných elektronů je přímo úměrný intenzitě dopadajícího světla. Po vypnutí přísunu světla se záporně nabitý náboj přesunují do CCD obvodů, ve kterých se odečítají jejich hodnoty a pokračují do registrů. Vytvářejí elektrický signál, který je převeden do digitálního signálu. Hodnota digitálního signálu se uloží do paměti. [24] [25]

V případě využití kamer je pro barevný obraz u CCD senzorů zapotřebí buď tři samostatných CCD senzorů, nebo použití barevných filtrů. Pro první variantu se používají tři barevné filtry (červený, zelený, modrý) umístěné před dílčí senzory. Druhá varianta uplatňuje barevné filtry umístěné před pixely. Mezi nejčastější uspořádání filtrů patří Bayerovské uspořádání. Toto uspořádání využívá žlutozelené barvy, na kterou lidské oko nejvíce reaguje. [26]

#### CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)

CMOS senzory mají oproti senzorům CCD jednodušší a běžnější technologii výroby. Nejsou moc vhodné pro kamery s potřebou lepší kvality obrazu. Využívají se v případech použití více stejných kamer, kde rozhoduje cena a rozměry. [25]

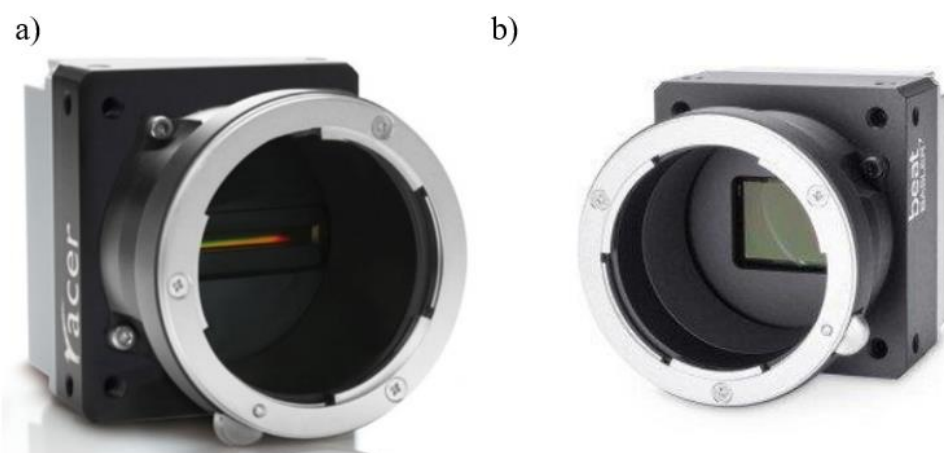
Konstrukce senzoru je složitější, protože převod na digitální signál se uskutečňuje na každé buňce. Z těchto důvodů senzor přečte obraz za kratší dobu a tím pádem šetří energii. V buňkách jsou, jak filtry, tak čočky pomáhající nařídít světlo na fotocitlivou část. CMOS dokáže rozpoznat pouze intenzitu světla, proto bude v rámci strojového vidění či optických systémů obraz černobílý. Problém se dá řešit barevnými filtry (červený (R), zelený (G), modrý (B)) neboli RGB. Ze čtyř buněk se skládá jeden pixel obsahující tři základní barvy (RGB). Zastoupení dvou políček má zelená barva díky již zmíněné citlivosti pro lidské oko. [27]

#### 5.4.2 Plošné (maticové) kamery

Tento druh kamer je nejčastěji využíváný (viz obr. 9 b). Jako senzory se používají CCD, nebo CMOS a rozlišení se uvádí v megapixelech. Používají se především černobílé verze kamer pro přesné měření rozměru s vysokým rozlišením detailů. Lze využít barevné kamery s Bayerovou maskou pro denní potřeby a snímání barevných součástí. [28]

#### 5.4.3 Řádkové kamery

Kamery (viz obr. 9 a) fungují jako skenery, které vlastní jen jeden řádek pixelů. Obraz se tvoří pohybem kamery nebo snímaného předmětu (např. na dopravníku, třídění výrobků). Princip kamery je ve snímání objektů za pomoci senzoru s jedním řádkem pixelů. Tudiž sledovaný objekt je snímán po řádcích a následně složen do jednoho obrazu, který je poslán k vyhodnocení do systému. Kamera má schopnost rychlého snímání pohyblivých objektů s vysokou kvalitou. [29]



Obr. 9) Kamery pro strojové vidění a) řádková kamera; b) maticová kamera [28] [30]

#### 5.4.4 Laser Tracker

Slouží pro měření dílů těžko měřitelných za pomoci dotykových metod. Skládá se z optické hlavice, kontroléru a stojanu (viz obr. 10). Se systémem lze manipulovat a je mobilní. Laser Tracker funguje na principu interferometru zakomponovaném v optické hlavě a měří ve sférických souřadnicích. Měření spočívá ve sledování sondy s koutovým odražečem za pomoci laserového paprsku. Při samotném měření se odečítají souřadnice polohy sondy s vysokou přesností a ty jsou pak posílány přes kontrolér, který zajišťuje nepřetržité sledování sondy, do počítače. V závislosti na souřadnicích se v software vytváří obraz měřeného dílu. Software si zajišťuje každá firma individuálně. [31]



Největší uplatnění Laser Trackeru bývá v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, těžkém strojírenství i ve stavebnictví, kde je třeba měření těžkých a velkých dílů. Vzhledem k tomuto použití musí být vyřešena odolnost systému proti nečistotám v prašných prostorách, v prostorách s olejovou mlhou aj. Využití nachází také při absolutní kalibraci robotu. [31]



Obr. 10) Laser Tracker se sondou [32]

#### 5.4.5 Teodolit

Teodolit je využíván v praxi jako měřicí přístroj pro měření vodorovných, svislých úhlů a vzdáleností (viz obr. 11). Určuje tři souřadnice v prostoru. Je to nejpřesnější systém z metod triangulace. Spadají převážně do odvětví stavebnictví, kde se měří základy staveb, nebo slouží k měření objektů velkých rozměrů. Nevýhodou může být dlouhá doba měření a potřeba minimálně dvou těchto přístrojů. [8] [33]

Pokud je teodolit vybaven navíc laserovým dálkoměrem stává se z něho „totální stanice“. Tato stanice dokáže navíc naměřené hodnoty přepočítat do pravoúhlých souřadnic. Měření vzdálenosti je provedeno s vysokou přesností (řádově milimetry). Naměřené hodnoty jsou jednak zaznamenávány v paměti přístroje a také je možné je převést do počítače. [33]



Obr. 11) Teodolit [34]

#### 5.4.6 Profilprojektory

Funkce profilprojektoru spočívá v nastavení čoček (často v podobě objektivu) a zrcadel tak, aby byl reálný objekt na podložce promítnut na zadní stranu stínítka (viz obr. 12). Objekt je nasvícen světelným zdrojem a na stínítku se promítá jeho stínový odraz. Pokud je známo zvětšení čoček lze měřit objekt ze stínítka přímo. Obrazovka profilprojektoru a optika přístroje udává velikost a zvětšení. Přístroj je vhodný pro rychlé a přesné přeměření objektu v rámci jednoduchých operací a práce s ním není složitá. [35]

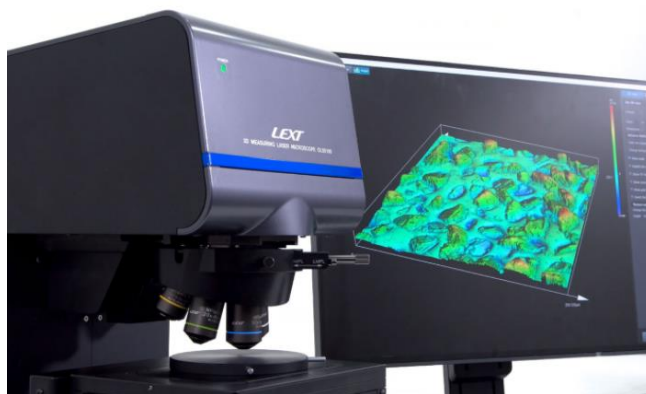


Obr. 12) Digitální profilprojektory [36] [37]

#### 5.4.7 Měřicí mikroskopy

Klasický optický mikroskop vytváří zvětšený, převrácený obraz objektu pomocí objektivu, který se následně sleduje pomocí okuláru. Aby byl obraz viditelný je třeba zdroje světla, který ozáří objekt. Konfokální mikroskop má možnost z části eliminovat zamlženost obrazu z mimoohniskových rovin. [16]

Laserový skenovací mikroskop OLS5100 na konfokálním principu slouží pro analýzu materiálu z hlediska vad v oblasti materiálového inženýrství. Mikroskop je schopný změřit tvar a drsnost povrchu v řádu submikronových částic. Pomocí několika objektivů s různým rozptylem měření může snímat různé velké objekty. Dokáže měřit 3D objekty díky konfokální metodě, výsledky jsou pak vyhodnoceny v software pomocí 3D obrazu. [38]



Obr. 13) Konfokální mikroskop OLS5100 [38]

### 5.4.8 Konfokální senzor

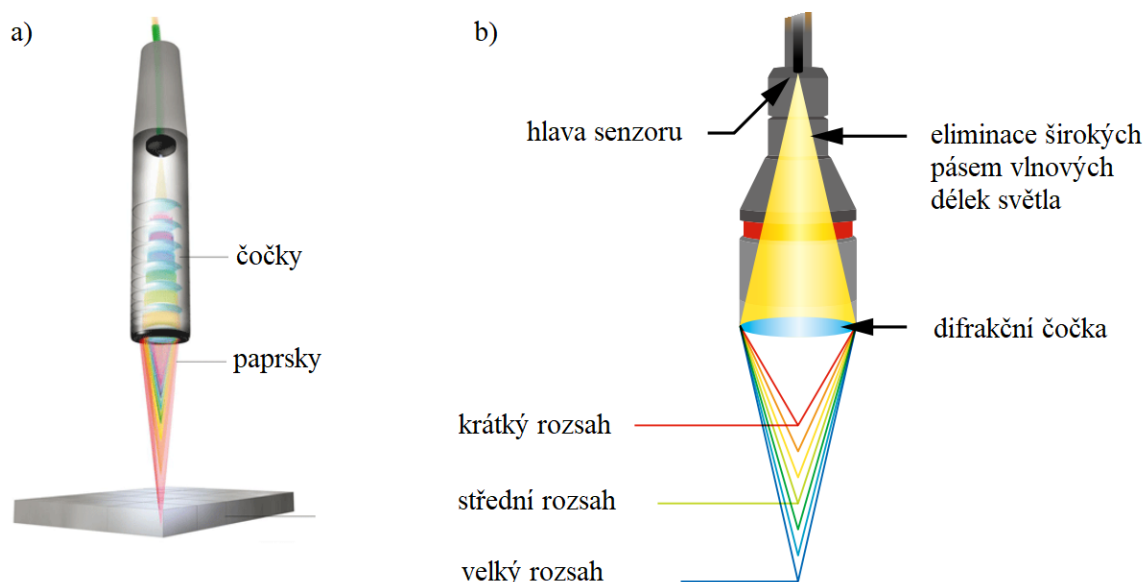
Senzor je principiálně řešen jako konfokální metoda popsána dříve v kapitole. Optika se skládá ze dvou čoček (nebo zrcadel) konfokálně uspořádaných, následně je senzoru doplněn o optický systém s více čočkami (viz obr. 14 a, b), ve kterých se rozkládá bílé světlo na různé vlnové délky (složky bílého světla). Každá vlnová délka dostane určitou odchylku v rámci procesu kalibrace. Zdroj světla tedy osvětluje čočky, ty rozkládají světlo na vlnové délky, které jsou rozloženy v různých vzdálenostech od daného materiálu. [13] [14] [15] [39]

Při měření je žádoucí pouze barva světla v určité hladině, která je na daný materiál zaostřená, proto jsou ostatní rozostřené obrazy nebo odrazy eliminovány např. konfokální clonou. Odráží se pouze zaostřený paprsek světla a dopadá na přijímač, ten jej přijme a pomocí spektrometru se zaznamenají změny spektra. [40]

Konfokální senzor se skládá ze snímací hlavičky a vyhodnocovací (řídící) jednotky. Snímací hlavička je tvořena soustavou čoček s funkcí, která již byla zmíněna a vyhodnocovací jednotkou, ta generuje zdroj světla a zajišťuje zpracování a vyhodnocení výsledků pomocí optického senzoru. [14]

Senzory jsou především využívány na měření vzdálenosti a tloušťky předmětu a spadají do skupiny nejlepších senzorů tohoto druhu. Přesnost měření se uvádí až do jednotek mikrometrů. [13] [14] [15]

K měření vzdálenosti objektů lze přiřadit i měření tloušťky materiálů. Velkou výhodou je možnost měření různých druhů materiálů i průhledných nebo s lesklým povrchem. Jejich využití je často směřováno k měření průhledných předmětů, na které jiné optické metody nelze aplikovat. Další výhodou jsou malé rozměry senzoru, které umožňují lepší pohyblivost v okolí předmětu. Mezi nevýhody patří omezený rozsah měření a potřeba velké čistoty okolí. [13] [40]

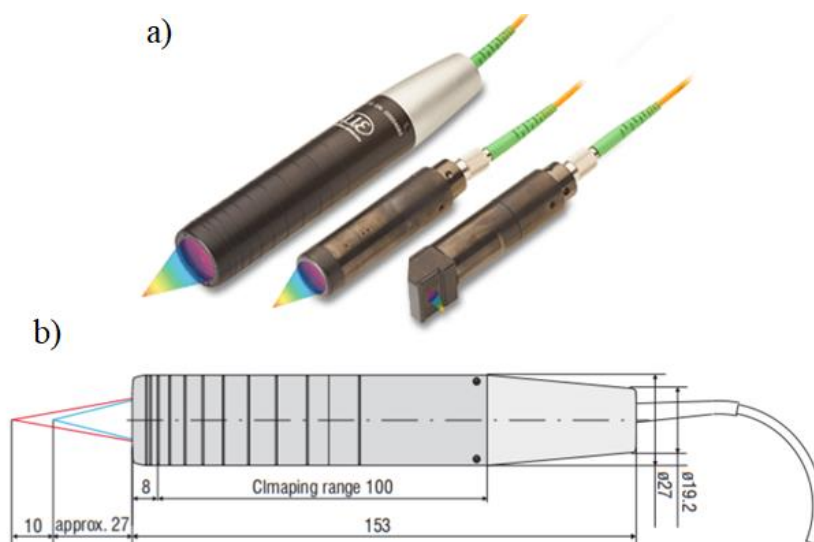


Obr. 14) Konfokální senzor a) možnost uspořádání [41]; b) popis [40]

Na současném trhu jsou výrobci, kteří se zabývají vývojem a výrobou konfokálních senzorů. Princip měření zůstává stejný, ale liší se například konstrukcí, počtem čoček optické soustavy, rozměry, měřicím rozsahem a linearitou. Snahou je pokrýt co největší spektrum aplikací. Pro přehled zde budou uvedeni zástupci výrobců s výčtem základních parametrů konfokálních senzorů.

### Konfokální senzor řady IFS2406 od výrobce Micro-Epsilon

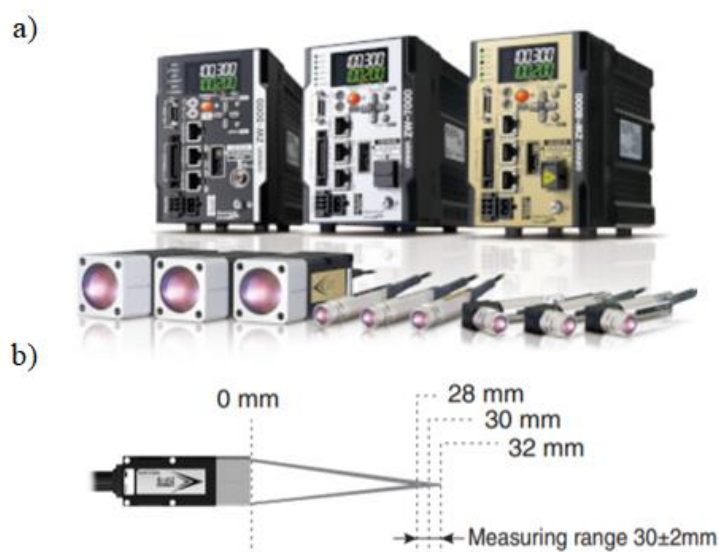
Jedná se o kompaktní konstrukci senzorové hlavičky. Tato řada disponuje vysokou přesností, která může dosahovat až  $\pm 0,3 \mu\text{m}$ . Průměrná přesnost se pohybuje kolem  $\pm 1 \mu\text{m}$ , podle použitého senzoru. Výrobce zajišťuje radiální i axiální variantu, tudíž se možnosti měření rozšiřují. Rozsah měření pro jednotlivé typy senzorů je uveden v hodnotách 2,5 mm, 3 mm a 10 mm (viz obr. 15). Rozsah měření se udává od referenční vzdálenosti. [42] [43]



Obr. 15) a) Konfokální senzory řady IFS2406; b) měřicí rozsah [44] [45]

### Konfokální senzor řady ZW od výrobce Omron

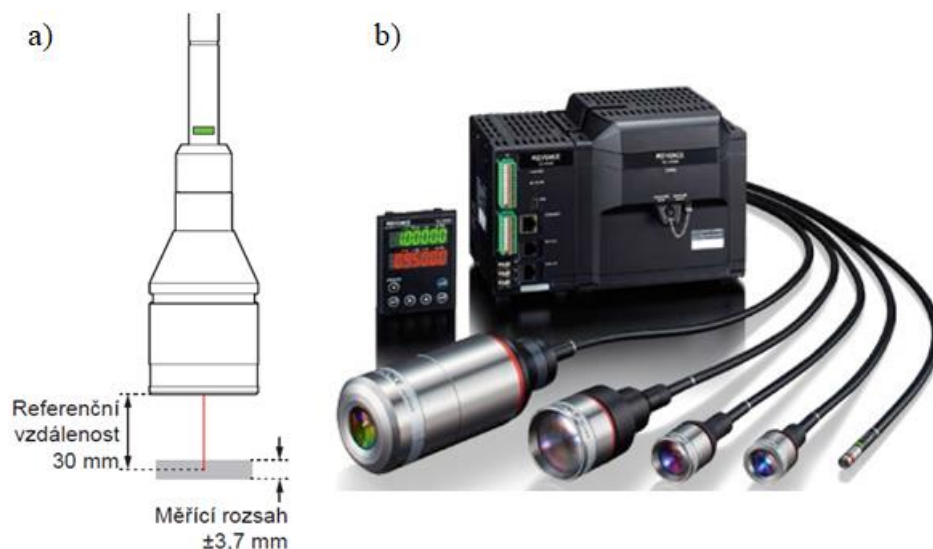
Senzory výrobce Omron mohou dosahovat přesnosti až do  $\pm 0,3 \mu\text{m}$  podle zvolené aplikace a nastavení senzoru. Rozsah měření je zde velmi rozmanitý a to od  $\pm 0,3 \text{ mm}$  až po  $\pm 3 \text{ mm}$  s referenční vzdáleností 7 mm, 10 mm, 20, mm, 30 mm a 40 mm (viz obr. 16). [46] [47]



Obr. 16) a) Konfokální senzory řada ZW; b) Měřicí rozsah [48] [49]

### Konfokální senzor řady CL-3000 od výrobce Keyence

Konfokální senzory jsou navrženy jako kompaktní řada senzorových hlavice pro rozmanité aplikace. I zde hraje roli vysoká přesnost měření až  $\pm 0,15 \mu\text{m}$  pro konkrétní aplikace a použitý senzor. Průměrná přesnost se pohybuje kolem  $\pm 1 \mu\text{m}$ . Rozsah měření (viz obr. 17) je zde od  $\pm 0,3 \text{ mm}$  do  $\pm 10 \text{ mm}$  s hodnotami referenčních vzdáleností 7 mm, 10 mm, 15 mm, 30 mm a 70 mm. [50] [51]



Obr. 17) a) Měřicí rozsah; b) Konfokální senzory řady CL-3000 [52] [53]

### **5.4.9 Laserové senzory (triangulační)**

Druh laserových senzorů fungující na principu triangulační metody. K měření je využíván viditelný laserový paprsek o vlnové délce cca 650-670 nm vycházející z vysílače senzoru (viz obr. 18). Funkce měření vzdálenosti je založena na triangulačním principu měření. Principiálně nezávisí měření na čase dopadu nebo intenzitě světelného paprsku, ale na místě jeho dopadu. Měření je spolehlivější a odolnější vůči okolním vlivům. [9] [10]

Nevýhodou může být klesající linearita při vzrůstající vzdálenosti měřeného objektu. Senzor nemá možnost měření objektů lesklých či průhledných materiálů jako konfokální senzor, v případě použití v takových aplikacích je nutné senzor správně nastavit. Při měření může dojít k chybě v důsledku mrtvého úhlu nebo špatného odrazu a následně dopadu na čidlo. [9] [10]



Obr. 18) Měření pomocí triangulačního laserového senzoru [54]

#### 5.4.10 Laserový interferometr

Tento přístroj slouží pro přesné měření tloušťky, kalibraci nebo změny vzdálenosti. Funguje na principu interference. Měření uskutečňuje vlnová délka světla helium-neonového laseru, která je hlavní jednotkou měření. [55]

Přístroj je zhotoven z laseru, optických prvků zajišťujících nasměrování a rozdělení světla, interferometru, přijímače (fotodiody), vláknové optiky a vyhodnocovací jednotky. [55]

Laserový paprsek se nechá odrazit od měřeného objektu zpět do senzoru a měří se počet proběhnutých vlnových délek v paprsku světla. Vzhledem k nemožnosti měření všech vlnových délek se měří změna jejich počtu při pohybu předmětu. Dané vlnové délky jsou sledovány pomocí interference (skládání) světla odraženého paprsku a referenčního paprsku. Senzor (fotodioda) zachycuje intenzitu interference světla. [55]

Výhodou oproti fyzickým přístrojům je odolnost vůči opotřebení a snížení mechanických nedostatků a chyb v měření. Instalace je možná v místě největší potřeby oproti mechanice, která je ve většině případů zakomponována uvnitř např. polohovacího ústrojí stroje. V řadě interferometrů jsou už také zabudovány kompenzátory vlivu prostředí (např. kontrola vlnové délky při změně prostředí). Lze také jedním laserem řídit více měřících os. [55]

### 5.5 Kalibrace

Pro lepší pochopení pojmu kalibrace je zde úvodem sepsána definice.

*„Kalibrace je činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace.“* [56]

*„Poznámka 1. Kalibrace smí být vyjádřena údajem, kalibrační funkcí, kalibračním diagramem, kalibrační křivkou nebo kalibrační tabulkou. V některých případech se smí skládat ze součtových nebo násobných korekcí indikace s přidruženou nejistotou měření.“* [57]

*„Poznámka 2. Kalibrace nemá být zaměňována s justováním měřicího systému, často mylně nazývaným „samokalibrace“, ani s ověřením kalibrace.“* [57]

*„Poznámka 3. Samotný první krok ve výše uvedené definici je často chápán jako kalibrace.“* [57]

#### 5.5.1 Kalibrace kamery

V případě využívání kamery na měřicí aplikace je třeba zajistit její kalibraci, neboť se při měření mohou vyskytovat různé druhy vad, které znehodnotí výsledek. Příkladem vzniklých vad může být zkreslení obrazu (nejčastější), chromatická aberace, axiální aberace bodů či astigmatismus atd. Kalibrací se rozumí nastavení parametrů kamery vzhledem k prostředí tak, aby se předešlo možným vadám. To zahrnuje určení vnější orientace pro správnou definici kamery. [7]

#### 5.5.2 Metody kalibrace kamery

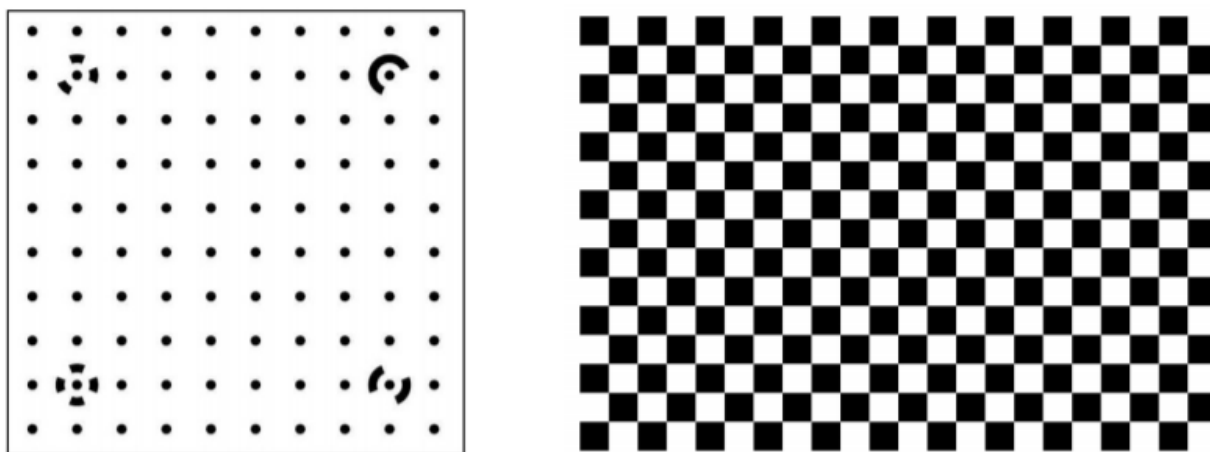
V průmyslových měřících aplikacích se obecně využívá metoda přepočtu pixelů na milimetry. Tento parametr je klíčový pro správné vyhodnocení rozměrů měřeného objektu. V tomto případě si proces kalibrace každá firma zprostředkovává sama, jako její know-how, základní princip ale zůstává stejný. Není to však jediný parametr, který je kontrolován. Jak již bylo



zmíněno, u kamer mohou nastat jiné optické problémy, které je potřeba řešit jinými metodami. [58]

Většina aplikací v současnosti využívá systému ve stupních šedi. Kalibrační metody jsou tedy založeny na jejím rozpoznávání. Převodem RGB (červená – zelená – modrá) obrazu získaný kamerovým systémem se převede na obraz ve stupních šedi a následně na binární. Při převodu ze stupňů šedi na binární obraz se musí nastavit prahová hodnota úrovně šedi, která rozdělí pixely. Pixely budou převedeny na bílé a černé pixely. Rozměrová měření jsou obvykle založena na rozpoznání pixelů popisujících obrys měřeného dílu a následného výpočtu rozdílu mezi polohou pixelů na okrajích objektu. Jedná se o jednu z nejjednodušších, nejběžnějších a nejpřesnějších metod založených na binárních obrazech. [58]

Dále se pro kalibraci kamer do prostoru vkládá kalibrační vzor (2D nebo 3D) (viz obr. 19), pomocí kterého lze přesně určit body a následně i jejich obraz v obrazové rovině. Principem je určování skutečné vzdálenosti od snímaného předmětu a velikosti daného kalibračního vzoru. [59]



Obr. 19) Kalibrační mřížky [59]

Další metody, které by se pro kalibraci kamery mohly používat budou pouze vyjmenovány pro ucelení přehledu. Jedná se o metody, které vycházejí z dalších studií a metod založených na výpočtech a přesně definovaných vzorcích. Metody jsou rozšířeny o experimentální části, které doplňují teoretickou rovinu. Každá následující metoda přebírá část metody předešlé a snaží se řešit její nedokonalosti a následně vyvodit výsledky pro další experimenty. Některé z metod využívají již zmíněné kalibrační vzorce a rozšiřují další možnosti kalibrace s jejich pomocí. Klíčovým výstupem je eliminace vzniklé chyby při kalibraci a celková rychlost procesu. Pokud se jedná o zpřesnění kalibrace, u většiny metod je to na úkor času, neboť je třeba například vyššího počtu hodnot. Zmíněné metody, jak uvádí zdroj, budou nadále testovány v průmyslové praxi. Do těchto metod spadají: [58]

- Metoda olovnice (Plumb line method)
  - kombinace matematického a praktického modelu;
- Dvoustupňová metoda (Two stage method)
  - využívá 2D kalibračního vzoru a kalibrace se provádí ve dvou „krocích“;
- Metody přímé lineární transformace (Direct Linear Transformation methods)
  - využívá 3D kalibračního vzoru a provádí se ve čtyřech „krocích“;

- Neznámá orientační rovina (Unknown orientations plane)
  - využívá 2D kalibrační vzor
  - jednoduchá, rychlá;
- Kalibrace kamery v software Matlab (camera calibration in Matlab)
  - kalibraci umožňuje rozšíření pro SW Matlab.

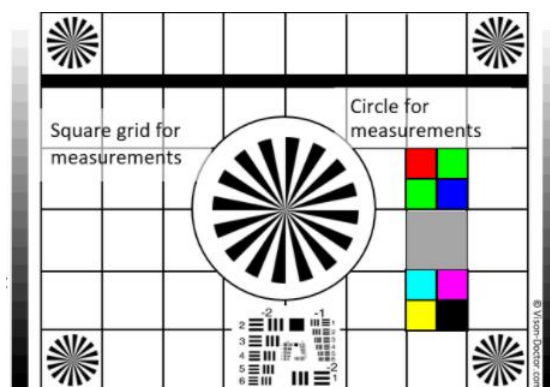
### 5.5.3 Příklady kalibrace kamery

#### Řešení Axima solution

Kalibrace je zajištěna kalibrační destičkou, která předchází zkreslenému pohledu kamery na předmět měření. Při natočení kamery (senzoru) pod úhlem není možné vyhodnotit správné rozměry. Kalibrační destička se vkládá do zorného pole kamery (senzoru) a vyhodnotí vztah mezi absolutními reálnými souřadnicemi a mezi relativními souřadnicemi kamery (senzoru). Dochází k přepočtu ze souřadnic kamery na reálné souřadnice a z pixelů na např. milimetry. [60]

#### Kalibrace řádkové kamery

Pro kalibraci řádkové kamery se využívá kalibrační tabulka (viz obr. 20), která určuje, jaký druh kalibrace je potřeba provést. Lze na ní vidět nedostatky kamery jako stín v rozích, pruhy na obraze, zkreslený obraz nebo nehomogenitu. [61]



Obr. 20) Univerzální kalibrační tabulka [61]

Kalibrace se dá provádět ve dvou krocích: [61]

- Kalibrace tmavého obrazu – lze použít kryt objektivu, tím se sjednotí tmavé pole pixelů. Po tomto procesu by měly všechny pixely vykazovat stejnou hodnotu černé.
- Kalibrace světlého (jasového) obrazu – využívá se pro korekci rozložení světla a citlivosti pixelů. Kamera se zaostří na homogenní referenční plochu s hodnotou jasnu kolem 50 – 75 %.

### 5.5.4 Kalibrace senzoru

V případě senzorů je také potřeba myslet na kalibraci, aby při opakovaném měření nedocházelo k rozdílným výsledkům, které by následně mohly znehodnotit práci.

Avšak senzory jsou kalibrovány jiným způsobem než kamery. Ve většině případů zajišťuje kalibraci výrobce, ten k výrobku přikládá „kalibrační protokol“. Zákazník si u výrobce může požádat i o re-kalibraci po uplynutí smlouvaného času (např. rok po poslední kalibraci), po níž opět dostává „kalibrační protokol“. Pod pojmem kalibrační list neboli kalibrační protokol se v této problematice rozumí doklad s vystavením závislosti mezi výstupním měřením



ze senzoru a normami definovanými referenčními hodnotami (mechanickými). Tímto je charakterizována kvalita. [62]

Kalibrace senzoru uloženého na stroji (robotu) už v rámci pracoviště, si každá firma zařizuje sama prostřednictvím metrologického oddělení, pokud takovou možnost má, nebo prostřednictvím nabízené služby (např. Český metrologický institut). Pověšinou se kalibrace provádí za pomoci keramického etalonu o různé tloušťce, který se vkládá pod senzor a sleduje se jeho linearita. [63]

### 5.5.5 Příklady kalibrace senzorů

#### Kalibrace konfokálního senzoru

Kalibrace konfokálních senzorů lze provádět různými způsoby. V práci budou slovně naznačeny dva druhy. Prvním z nich je kalibrace pomocí etalonu. Etalon bývá přesně definovaný objekt se známými rozměry, podle kterého se senzor kalibruje. Kalibrace spočívá v najetí do konkrétních bodů etalonu a zkontrolování hodnot.

Druhým způsobem je kalibrování pomocí délkoměru. Délkoměr je měřicí přístroj pro měření délek a lze jej využít i na kalibraci např. odpichu, kroužku, úchylkoměru aj. Při kalibraci konfokálního senzoru se do délkoměru tento senzor upne a jeho signál se odráží od pohyblivého doteku délkoměru. [64] [65]

#### Kalibrace laserového senzoru na triangulačním principu

Kalibrace senzoru optoNCDT 2300 se provádí za pomoci bílé, jemnozrné keramické destičky, která slouží jako referenční měřítko (etalon). Na senzoru se v základu zkoumá jeho linearita v krajních bodech (maxima a minima měřené vzdálenosti). Obecně u těchto druhů senzorů dochází ke snížení linearity se vzrůstající vzdáleností. Informace o přesné vzdálenosti lze získat například za pomoci zprůměrování míst vzorků s rozdílnými jemnými strukturami. [66]

V kalibračním protokolu jsou uvedeny limity linearity (a zobrazeny další dva soubory dat). Při změně umístění vzorku je pomocí křivky ukázána střední odchylka naměřených hodnot pro každý krok. Jednotlivé datové body představují odchylky linearity. [66]

Podle normy DIN 32877 je pro určení chyby linearity potřebné uskutečnit 20 měření v nepravidelných intervalech s naměřenými 5ti hodnotami na jednom měřeném kroku. Chyba se následně vyhodnotí z průměru 50ti naměřených hodnot pro každý krok měření. [66]

V poslední části kapitoly se práce zaměří na optické senzory a jejich srovnání společně s porovnáním dvou firem.

## 5.6 Srovnání

V předešlých podkapitolách byly uvedeny optické měřicí přístroje, jejich funkce a způsoby kalibrace. Dále se však práce omezí na optické senzory na měření polohy a vzdálenosti, s ohledem na zadání. V praxi je několik typů optických senzorů na měření vzdálenosti a polohy, ale mezi nejrozšířenější typy patří laserový senzor na triangulačním principu a konfokální senzor. Tyto senzory ve své nabídce uvádí firma Keyence, Micro Epsilon, Sick, Omron a další.

Pro účely práce byl vybrán konfokální senzor. Jelikož se jedná o aplikaci měření pomocí robotického ramene, je potřeba mít možnost umístit senzor na přírubu robotu, a to umožňuje právě konfokální senzor. V rámci již zmíněných funkcí, kterými tento senzor

disponuje, je vhodnou volbou pro měření tohoto typu. Následuje stručný přehled výhod zmíněného senzoru.

Mezi užívané optické senzory pro měření vzdálenosti a polohy spadají již zmíněné laserové senzory na triangulačním principu a konfokální senzory, které jsou často vzájemně srovnávány. Konfokální senzory také začaly nahrazovat laserové senzory pro jejich vlastnosti. Oproti laserovému senzoru má konfokální senzor výhodu v provedení tvaru a v důsledku toho, větší oblasti využití (např. využití společně s robotem, stísněná místa atd.). Další výhodou konfokálních senzorů je větší rozmanitost měření různých povrchů. Možno je využívat pro různé typy povrchů i lesklých a průhledných. Velkým rozdílem mezi těmito dvěma typy senzorů je konstrukční stránka. Konfokální senzor má ve snímací hlavě pouze čočky, a proto není tepelně zatěžován a nedochází k výchyilkám měření. Laserový senzor má ve snímací hlavě zabudovanou, jak optiku, tak i detektor a zdroj světla. [40] [50]

Jako zajímavost jsou dále uvedeny dvě firmy zabývající se senzorikou spadající do tématu diplomové práce. Jednou z firem je KEYENCE, ze které bude použit senzor pro měřicí aplikaci. Za druhou firmu byla vybrána společnost Micro-Epsilon, jelikož s ní firma Elvac a.s. také spolupracuje pro její obsáhlý sortiment v této problematice.

#### Firma KEYENCE

Společnost KEYENCE spadá v současnosti do globálních lídrů v průmyslové aplikaci. Pobočky lze nalézt po celém světě se zastoupením na cca 220 místech a 110 zemích. [5]

Obsáhlou oblastí firmy je vývoj a výroba zařízení průmyslové automatizace. Přesněji se firma zabývá dodáváním senzorů, měřících systémů, popisovacích laserů, systémů pro strojové vidění a mikroskopů. Věnuje se i bezpečnosti v průmyslových aplikacích. [5]

V oblasti měřicí optické senzoriky se jedná o laserové profilometry, laserové měření vzdálenosti (konfokální senzory, laserové senzory) a optické mikrometry. [5]

#### Firma MICRO - EPSILON

Pro porovnání nabídky byla zvolena firma zabývající se senzorikou a měřicí technikou, v níž je v dnešní době přes 500 zaměstnanců v České republice. Mezi další místa, kde sesterské společnosti sídlí, patří Anglie, Amerika, Čína, Francie a Švýcarsko. [6]

Výroba je zaměřena na senzory pro měření vzdálenosti, polohy a profilu, kamery pro bezdotykové měření teploty povrchu materiálu, infračervené teploměry, systémy pro měření rozměrů a nalezení vad. [6]

Pro porovnání sortimentu s firmou KEYENCE lze i zde uvést optické senzory pro měření vzdálenosti a polohy, laserové senzory na triangulační bázi, konfokální senzory se zdrojem bílého světla, interferometry a optické dálkoměry. [6]

## 6 SYSTÉMOVÝ POPIS ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

V této kapitole se práce zaměří na rozbor jednotlivých komponent pracoviště a jeho celkový popis. Pro správný postup popisu řešeného problému je třeba nejprve definovat pojem *systémový přístup*.

### 6.1 Systémový přístup

Aby se dosáhlo lepšího porozumění, je vhodné na úvod vysvětlit základní pojmy, které se systémového přístupu týkají. [67] [68]

Základní pojmy [67] [68]

- Prvek – samostatná, oddělitelná část řešeného problému;
- Vazba – spojení prvků, zajišťuje ovlivňování na sebe vázaných prvků;
- Entity – systémové objekty;
- Systém (složitě entity) – množina prvků a vazeb mezi nimi, které definují celek;
- Struktura (množina prvků) – způsob, jakým budou prvky a jejich vazby uspořádány;
- Vstup – na systém působící okolí, vklad informací, hodnot atd.;
- Výstup – na okolí působí systém, výsledek systému;
- Proces – přeměna vstupů na výstup/y.

Systémový přístup se řadí mezi příklady možných přístupů člověka k tvorbě nejrůznějších činností. Těmito činnostmi se myslí různé druhy analýz objektů a procesů, řešení odborných, ale i běžných problémů a v neposlední řadě i typu myšlení aj. Za předchůdce systémového přístupu se považují „Množinový přístup“ a „Celostní přístup“. Množinový přístup pracuje s entitami (objekty) pouze jako s množinami prvků bez možností vazeb mezi jednotlivými prvky. Entity (objekty) však už byly chápány jako rozdělitelné. Celostní přístup funguje na principu celkového kontextu. Tudiž vlastnosti a reakce složitých entit se dají posuzovat pouze v celku (s prvky a vazbami mezi nimi). Celostní přístup posléze dostal název Systémový přístup, u kterého se z organizace celku usuzuje chování entit. [68] [69]

*„Za systémový přístup považujeme způsob myšlení, způsob řešení problémů či způsob jednání, při němž jsou jevy chápány komplexně ve svých vnitřních a vnějších souvislostech.“ (J. Habr-J. Vepřek: Systémová analýza a syntéza) [68]*

Jak již bylo uvedeno v definici, systémový přístup zajišťuje způsob myšlení a řešení problémů komplexním způsobem. Důležitým aspektem jsou dílčí souvislosti vnitřní, ale i vnější (respektování okolí). Cílem systémového přístupu je pomocí vhodného uspořádání formulovat a lépe pochopit řešenou problematiku. Prvním krokem při využití systémového přístupu je definovat zkoumaný systém a požadavky na něj. Pojem systém je třeba chápat jako soubor prvků se vzájemnou výměnou informací (energie, hmoty) pomocí vazeb, kde všechny tyto aspekty slouží k určení vlastností celku. Z tohoto vyplívají základní znaky systému: [67] [68]

- Systém se skládá z prvků;
- Prvky jsou spojeny interaktivními vazbami;
- Systém se svým okolím může vytvořit vazby;
- Systém je tvořen za určitým účelem nebo cílem.

Pro přísun informací do systému slouží vstupy, ty jsou pomocí procesů, technik nebo nástrojů přetvořeny v systému na výstupy. Veškeré výstupy mohou dále sloužit jako vstupy pro jiný systém. Jelikož jsou na sebe prvky vázány a jsou závislé dochází v případě jedné změny k ovlivnění celého systému. [67] [68]

Přístup může být postaven na definování systému jako celku a následném detailnějším rozebírání jednotlivých částí, nebo lze zvolit opačný přístup a začít od „nejjednoduššího“ a postupně se propracovat ke „složitějšímu“ (tzv. zjednodušit složitý systém). V případě využití systémového přístupu je na prvním místě detailní rozbor jednotlivých prvků systému a následné definování vazeb mezi nimi, dále se přístup může rozdělit do dalších úrovní, aby byly přehledně pokryty veškeré aspekty. [67] [68]

Systémový přístup se tedy dá pochopit jako složitá forma představivosti a náhledu, která poskytuje naopak snadno pochopitelnou a srozumitelnou podmínku pro hodnocení jednotlivých činností, jevů atd. [67] [68]

## **6.2 Řešený problém měřicí aplikace**

Cílem práce je zhotovit měřicí aplikaci pomocí robotického ramene tak, aby zkrátila časy na přeměření potřebných dílů nebo součástí. Jedná se o optimalizaci měření dílů pomocí optického senzoru namísto dotykového senzoru. Tato konkrétní aplikace slouží pouze pro testovací účely, ze kterých následně firma bude vycházet v případě konkrétního měření.

### **6.2.1 Postup**

V diplomové práci bude třeba (pomocí programu RobotStudio) se zaměřit na sjednocení celého pracoviště a vytvoření zbylých potřebných komponent. Dále vytvořit vhodné body pro nájezdy a výjezdy robotu se senzorem pro zamezení kolize s měřeným objektem nebo pracovištěm. Ošetřit konfiguraci ramen robotu tak, aby nedocházelo k přetáčení a zbytečným pohybům. Dalším krokem bude vytvořit dráhy robotu pomocí těchto bodů a vybrat nejvhodnější rychlosti pohybu v daných částech trajektorií společně se vzdálenostmi nájezdů do daných bodů. Po dokončení všech těchto úkolů se simulace zkontroluje, zda časově vyhovuje.

### **6.2.2 Cíle práce**

Cíle diplomové práce jsou:

- Návrh a vývoj měřicí aplikace v software RobotStudio;
- popis kalibrace robotu a měřicího senzoru;
- posouzení vlivu rychlosti a orientaci ramen na přesnost a opakovatelnost měření;
- zhodnocení výsledků.

### **6.2.3 Pracoviště jako celek**

Pracoviště je zhotoveno z buňky, robotu IRB 1200-5/0.9 s řídicí jednotkou IRC5C Compact a pracovní desky s kalibračními značkami, na kterou je umístěn díl. Na robot je pomocí koncového efektoru nasezen senzor CL-P030.

### **6.2.4 Měřicí aplikace**

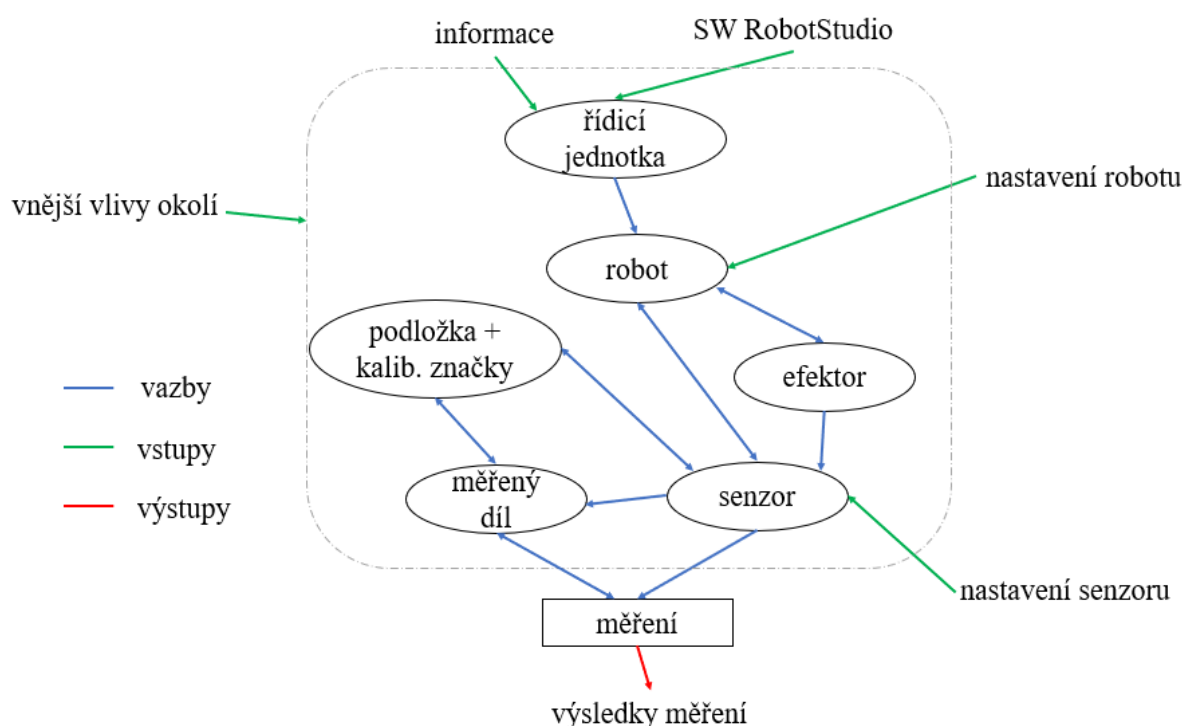
Před měřením je důležité nastavit/kalibrovat senzor s robotem. V rámci této aplikace se jedná o naučení robotu bodům, na které bude najíždět před každým novým cyklem měření. Tím se zajistí ověření správného umístění dílu a přesnosti při najíždění na body v procesu měření.

Při samotném měření robot najíždí nad dílčí body vybrané pro měření. Body musí být orientovány tak, aby na ně mohl robot bez problému najet a nevznikla kolize. Vzdálenost dílu od měřicího senzoru je dána dosahem senzoru (tzn. 30 mm). Při příjezdu do bodu měření robot na chvíli zastaví (na řádově desetiny vteřiny) a následně pokračuje na další bod v pořadí.

Klíčovými parametry pro správný chod aplikace je volba dostatečného počtu bodů, jejich rozmístění, vhodná rychlost robotu a orientace jeho os, tak aby nedocházelo ke kolizi, či zbytečnému přetáčení. Dalším aspektem je pak samotný čas celého cyklu včetně kalibrace.

#### Použité komponenty pro měřicí aplikaci

Pro přehlednost je zde uvedeno schéma a komponenty spadající do pracoviště pro měřicí aplikaci (viz obr. 21):



Obr. 21) Schéma pracovního prostoru měřicí aplikace

- buňka pro robot;
- robot;
- řídicí jednotka robotu (kontrolér);
- koncový efektor;
- optický (konfokální) senzor;
- pracovní deska pro umístění měřeného dílu;
- kalibrační značky;
- měřený díl.

#### **6.2.5 Zvolený robot**

Pro aplikaci optického měření byl zvolen robot IRB 1200-5/0.9, jehož výrobcem je firma ABB. Tento typ robotu spadá do řady IRB 1200. Řada se skládá ze dvou druhů robotů, a to varianty s menším dosahem a vyšší nosností (700 mm; 7 kg) a firmou vybraného s větším dosahem a nižší nosností (900 mm; 5 kg). [70]

Tato řada je konstruována kompaktně na menší rozsah ramene a jeho kratší pohyb mezi jednotlivými body. Zkracuje se délka cyklu díky menšímu pracovnímu prostoru, proto je robot vhodný pro práci s méně rozměrnými objekty. Umožňuje se i montáž robotu na strop či stěnu pracovního prostoru. Odolnost robotu zajišťuje ochrana IP 40 s možností využití vyšší ochrany IP 67. [70]

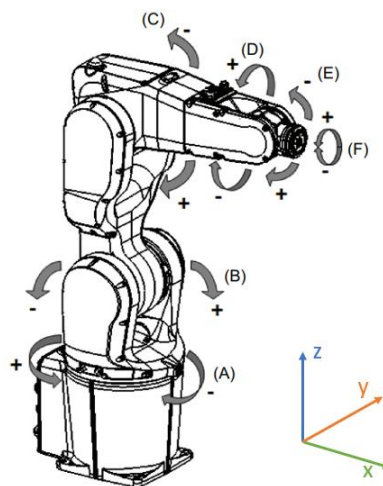
Příklady aplikací, ve kterých lze robot využít:

- montáž;
- manipulace s materiálem;
- obsluha stroje;
- značení laserem;
- leštění;
- tlakové vstřikování;
- balení.

Tento typ je zvolen z důvodu malého pracovního prostoru, ve kterém se snadno pohybuje i v případě krátkých trajektorií. Nižší únosnost zvoleného robotu není vzhledem k velikosti senzoru, a především jeho hmotnosti a hmotnosti efektoru překážkou.

#### Specifikace

Jedná se o 6-tiosý robot se sériovou kinematikou a rotací kloubů kolem jednotlivých os (viz obr. 22) s hmotností 52 kg a maximální délkou dosahu 901 mm. Nosnost dosahuje maximálně 5 kg pokud se pohybuje v blízkosti zástavbové plochy, při větších vzdálenostech klesá únosnost až na 1 kg. Klouby rotují kolem os  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , přičemž kolem osy  $x$  se jedná o dvě rotace (D, F), kolem osy  $y$  o tři rotace (B, C, E) a u osy  $z$  se jedná o jednu rotaci (A). Při rotaci kolem osy  $z$  dochází k maximálnímu rozsahu (natočení) při  $170^\circ$ . Robot pracuje s vysokou přesností v okolí s teplotou od  $5$  do  $45^\circ\text{C}$ . Komponenty jako jsou pneumatické rozvody a kabeláž jsou uloženy pod vnějším krytem, aby nedocházelo k poškození kabeláže, zbytečnému znečištění a snížily se nároky na údržbu. [70]



Obr. 22) Osy robotu [70]

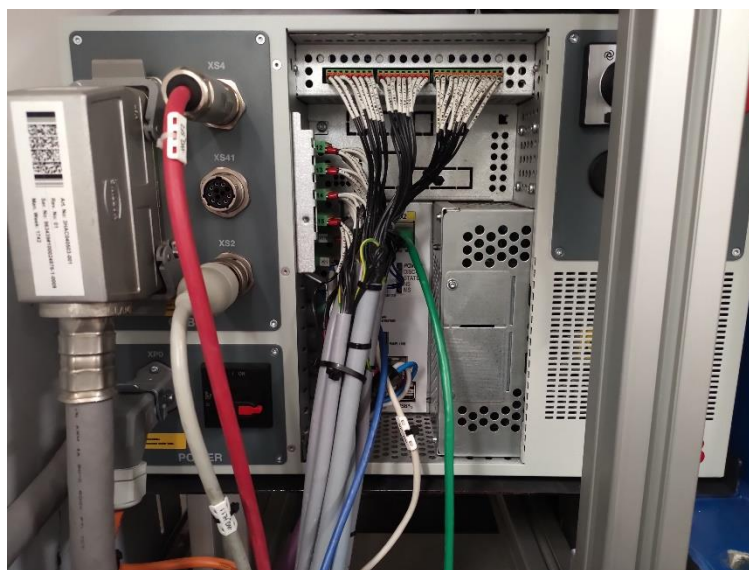
V případě montáže na zem či podstavu se kalibrace provádět nemusí (prodejce uvádí, že robot je kalibrován) v případě využití montáže na strop, nebo zeď je třeba kalibraci provést znovu.

Tab 1) Technické parametry [70]

Nosnost [kg]	5
Dosah [mm]	901
Opakovatelnost [mm]	0,025
Přesnost [mm]	0,02
Opakovatelnost lineár. dráhy [mm]	0,07
Přesnost lineár. dráhy [mm]	0,53
Zástavbová plocha [mm]	210 x 210
Zákaznické rozhraní	Volitelné
Hmotnost [kg]	52
Montážní plocha	Podlaha, stěna, možno zavěsit
Teplota [°C]	5–45
Stupeň ochrany	IP 40 (standartní verze), IP 67 (na přání)
Max. rychlost TCP [m/s]	8,9
Max. zrychlení TCP [m/s <sup>2</sup> ]	36
Doba zrychlení 0-1 m/s [s]	0,06

### 6.2.6 Řídicí jednotka IRC5C Compact

Řídicí jednotka IRC5C Compact (viz obr. 23) slouží pro řízení a komunikaci s robotem prostřednictvím kabeláže. Jedná se o kompaktní provedení kontroléru. Pomocí řídicí jednotky se zajišťuje přesný pohyb robotu a jeho nadefinovaná trasa. V případě využití programu MultiMove je možné ovládat dohromady čtyři roboty zároveň. Tato jednotka byla vybrána kvůli malé zástavbové ploše, aby nezabírala místo a nedocházelo tak k nárustu rozměrů robotické buňky. Jednotka IRC5C může využívat funkci SafeMove2, která slouží k zajištění bezpečnosti na pracovišti. [71]



Obr. 23) Řídicí jednotka

Tab 2) Technické parametry IRC5C Compact [71]

<b>Hmotnost [kg]</b>	28,5
<b>Rozměry [mm]</b>	320 x 449 x 442
<b>Připojení k síti</b>	200/230 V, 50–60 Hz
<b>Provozní teplota [°C]</b>	0–45
<b>Max. vlhkost vzduchu [%]</b>	95
<b>Stupeň ochrany</b>	IP20

Zmíněná řídicí jednotka spadá do řady kontrolérů IRC5, ve které se vyskytují další dva typy, a to IRC5 Paint Controller a IRC5 Cabinet. V rámci této řady se jedná o nejmenší provedení kontroléru. [71]

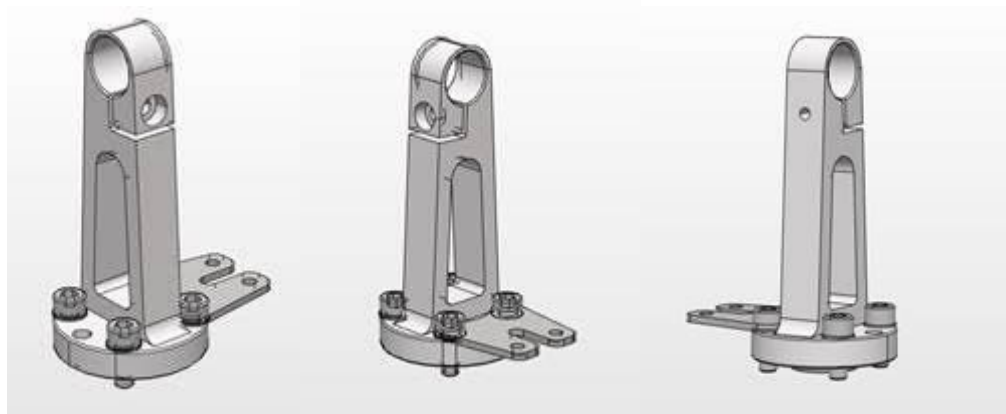
Pro porovnání rozměrů oproti běžné řídicí jednotce IRC5 Cabinet, jsou zde uvedeny její parametry.

Tab 3) Technické parametry IRC5 Cabinet\_[71]

<b>Hmotnost [kg]</b>	150
<b>Rozměry [mm]</b>	970 x 725 x 710
<b>Připojení k síti</b>	200–600 V, 50–60 Hz
<b>Provozní teplota [°C]</b>	0–45
<b>Max. vlhkost vzduchu [%]</b>	95
<b>Stupeň ochrany</b>	IP 54

### 6.2.7 Koncový efektor pro konfokální senzor

Koncový efektor je zhotoven z materiálu EN AW 7022 CERTAL, jeho délka je 90 mm a průměr příruby se shoduje s průměrem příruby robotu tj. 40 mm. Umísťuje se na přírubu robotu a na druhém konci je do něj upnut konfokální senzor. Tato sestava plní úlohu měření.



Obr. 24) Koncový efektor

### 6.2.8 Konfokální senzor CL-P007 / CL-P030

Pro diplomovou práci a aplikaci ve firmě se rozhodovalo mezi dvěma modely od firmy KEYENCE - konfokální senzor CL-P007 (viz obr.25 a) a CL-P030 (viz obr.25 b) kompaktní model z řady CL-3000. Tato řada využívá vícebarevného zdroje světla společně s konfokální metodou měření. Vícebarevné světlo zajišťuje modrý laserový paprsek, který osvětluje



fluorescenční prvek, ten poté navíc vyzařuje červené a zelené světlo. Laserové světlo zajišťuje vyšší stabilitu a jas oproti LED světlu, díky tomu je měření zpřesněno. Senzor je složen z měřicí hlavy, ve které jsou uloženy pouze čočky, a řídicí a optické jednoty, kde je umístěn zdroj světla a potřebná elektronika. Vzhledem k tomuto uspořádání není snímací hlava zatěžována elektronikou a nedochází k přehřívání, nebo teplotním výkyvům, či elektrickému rušení aj. [50]

Referenční vzdálenost měření pro senzor CL-P007 je 7 mm a měřicí rozsah činí  $\pm 1,5$  mm. Vzhledem k malému průměru senzoru CL-P007, který dosahuje 8 mm je vhodný i pro měření v úzkých prostorech.

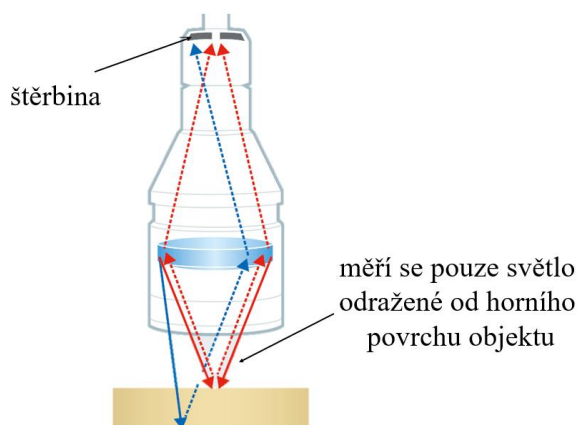
Referenční vzdálenost měření pro senzor CL-P030 je 30 mm a měřicí rozsah činí  $\pm 3,7$  mm.



Obr.25) Sensory a) CL-P007; b) CL-P030 [50]

#### Snímací hlava senzoru

Jedná se o část senzoru, která vykonává měření (viz obr.25). Jak již bylo zmíněno, je zde umístěna pouze soustava čoček a provozní indikátor. Přes čočky prochází barevné světlo a je rozdělováno do jednotlivých vlnových délek, díky kterým bude určena vzdálenost či tloušťka měřeného materiálu (viz obr. 26). Vícebarevné světlo je pomocí přední difrakční čočky zaostřeno v různé výšce pro každou vlnovou délku. V tomto případě je definována červená složka světla na krátký dosah, zelená složka světla na střední rozsah a modrá složka světla na dlouhý rozsah. Při měření se zpět přes indikátor do štěrby vrací světlo o vlnové délce, které nejvíce odpovídá ohnisku (je z nich nejvíce zaostřeno). Pro měření hrubých povrchů, nebo malých nerovností slouží princip čtyřnásobného zpracování dat. Světlo dopadá na čtyři body plochy materiálu, každé světlo jednotlivého bodu je samostatně zpracováno za pomoci CMOS senzoru. [40] [50]



Obr. 26) Snímací hlava senzoru – měření průhledného povrchu [40]

### Optická a řídicí jednotka

Další potřebné komponenty jakožto zdroj světla a elektronika jsou zabudovány v řídicí a optické jednotce (viz obr. 27). Řídicí jednotka zajišťuje komunikaci s okolím jako je počítač nebo PLC, zobrazovací panel pro aktuální hodnoty měření, popřípadě jiné senzory. Komunikace s PLC se používá převážně v případě střídání senzoru mezi pracovišti, případně mezi typy robotů. Dále je rozebrána optická jednotka. [40] [50]

- Jednotka světelného zdroje využívá vícebarevného světla vyzařující jeho všechny vlnové délky se stále stejnou intenzitou a vysokým jasnem.
- Za pomoci spektrometru je světlo děleno v závislosti na jeho vlnové délce a následně zaostřeno na CMOS senzor.
- Čtyři senzory CMOS s vysokým rozlišením přijímající světlo umožňují velmi přesné měření pro různé druhy materiálů.

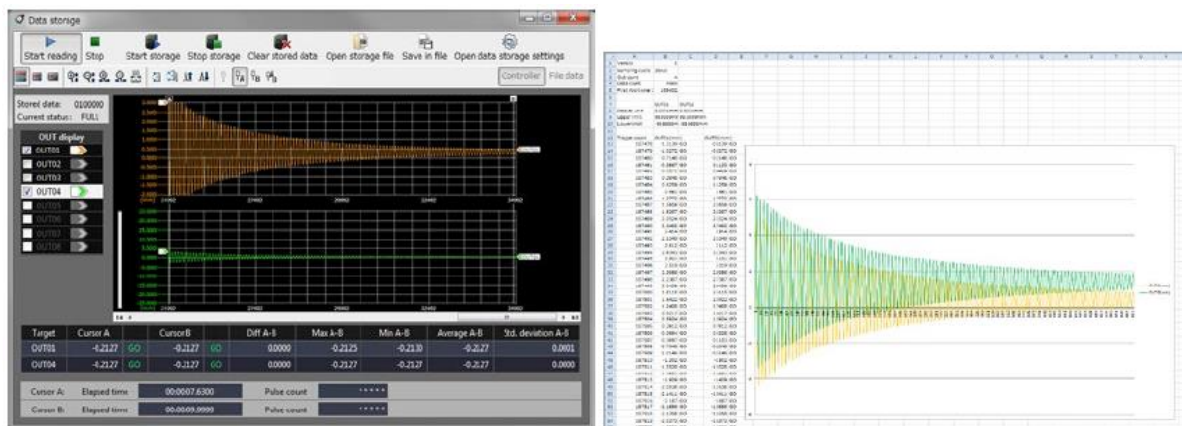
Pozn: Spektrometr slouží k měření spektra světla nebo elektromagnetického záření.



Obr. 27) Sestava řídicí jednotky a optické jednotky [72]

### Počítačový software: CL-NavigatorN

Software pro nastavení senzoru a dalších funkcí, který zajišťuje výrobce. Pomocí tohoto softwaru lze nastavit měřicí režim, různé zobrazení dat a následně možnosti vyhodnocování hodnot a výsledků (viz obr. 28 a). Data, která jsou v software nahrána se dají ukládat ve formátu .CSV a následně otevřít v aplikaci Excel (viz obr. 28 b). [50]



Obr. 28) Software a) CL-NavigatorN; b) Export do aplikace Excel

### Srovnání optické osy

Senzor je vybaven funkcí zarovnání os v případě měření tloušťky materiálu. Při měření tloušťky je třeba použít dva protilehlé senzory vysílající paprsek v jedné ose (viz obr. 29). V případě, kdy se optické osy vychýlí či dojde k vibraci materiálu, může dojít k nepřesnému měření. Tyto senzory umí eliminovat nepřesnosti a srovnat optické osy tak, aby nedocházelo k chybnému měření. [40] [50]



Obr. 29) Vícebodové měření tloušťky [40]

Senzor umožňuje měřit různé druhy materiálů, jako jsou např. kov, zrcadlové objekty, černá pryž (pneumatiky), sklo, gel. Lze ho také využít při měření rovinnosti, měření vibrací motoru HDD, měření křivosti a rozkmitu kotouče a dalších aplikacích. Další výhodou je možnost měření materiálů se zakřiveným povrchem nebo zkosením. Minimalizuje se vznik mrtvých úhlů při měření díky konfokální metodě. [40] [50]

Výrobce umožňuje snadnou instalaci pomocí montážního přípravku se snadným zprovozněním senzoru, tím se eliminují chyby vzniklé špatným uchycením. Senzor lze připevnit i na robot a zajistit měření jeho prostřednictvím. [40] [50]

Tab 4) Technické parametry CL-P007 [40] [50]

		Hlava	Optická jednotka
Referenční vzdálenost		7 mm	-
Referenční měřicí rozsah	Rozsah měření	$\pm 1,5$ mm	-
	linearita	$\pm 0,96$ $\mu$ m	-
Měřicí rozsah v režimu vysoké přesnosti	Rozsah měření	$\pm 0,5$ mm	-
	linearita	$\pm 0,55$ $\mu$ m	-
Rozlišení		0,25 $\mu$ m	-
Průměr měřicího bodu		$\varnothing$ 50 $\mu$ m	-
Třída laseru		-	Třída 1
Vzorkovací frekvence		100/200/500/1000 $\mu$ m	-
Stupeň krytí		IP67	-

<b>Okolní osvětlení</b>	Intenzita osvětlení povrchu objektu 30 000 lux	
<b>Provozní teplota</b>	0 až 50 °C	
<b>Provozní okolní vlhkost</b>	20% až 85% (bez kondenzace)	
<b>Odolnost proti vibracím</b>	10 až 57 Hz dvojitá amplituda 1,5 mm, 2 hodiny každá osa (X, Y, Z)	10 až 57 Hz dvojitá amplituda 0,3 mm, 2 hodiny každá osa (X, Y, Z)
<b>Odolnost proti nárazu</b>	15 G 6 ms	
<b>Teplotní charakteristika</b>	0,005% z pl. Rozs./ °C	0,015% z pl. Rozs./ °C
<b>Materiál</b>	SUS	polykarbonát
<b>Hmotnost</b>	Cca 140 g	Cca 1600 g

Tab 5) Technické parametry CL-P030 [40] [50]

		<b>Hlava</b>	<b>Optická jednotka</b>
<b>Referenční vzdálenost</b>		30 mm	-
<b>Referenční měřicí rozsah</b>	<b>Rozsah měření</b>	± 3,7 mm	-
	<b>linearita</b>	± 0,94 µm	-
<b>Měřicí rozsah v režimu vysoké přesnosti</b>	<b>Rozsah měření</b>	± 1,0 mm	-
	<b>linearita</b>	± 0,72 µm	-
<b>Rozlišení</b>		0,25 µm	-
<b>Průměr měřicího bodu</b>		ø 38 µm	-
<b>Třída laseru</b>		-	Třída 1
<b>Vzorkovací frekvence</b>		100/200/500/1000 µm	-
<b>Stupeň krytí</b>		IP67	-
<b>Okolní osvětlení</b>		Intenzita osvětlení povrchu objektu 30 000 lux	
<b>Provozní teplota</b>		0 až 50 °C	
<b>Provozní okolní vlhkost</b>		20% až 85% (bez kondenzace)	
<b>Odolnost proti vibracím</b>		10 až 57 Hz dvojitá amplituda 1,5 mm, 2 hodiny každá osa (X, Y, Z)	10 až 57 Hz dvojitá amplituda 0,3 mm, 2 hodiny každá osa (X, Y, Z)
<b>Odolnost proti nárazu</b>		15 G 6 ms	
<b>Teplotní charakteristika</b>		0,005% z pl. Rozs./ °C	0,015% z pl. Rozs./ °C
<b>Materiál</b>		SUS (vpředu), hliník (vzadu)	polykarbonát
<b>Hmotnost</b>		Cca 200 g	Cca 1600 g

Tab 6) Kabeláž (prodlužovací kabel pro snímací hlavu) [40] [50]

Model	CL-C5	CL-C10	CL-C30
Délka	5 m	10 m	30 m
Hmotnost	450 g	850 g	2500 g

#### Upevnění na robot

Snímací hlava se umístí na koncový efektor, který je přimontován k robotu. Řídící a optická jednotka budou umístěny poblíž kontroléru pod pracovním prostorem. Tyto dvě části propojuje optický kabel vedený od jednotek přes robot až do snímací hlavy senzoru.

Ze dvou možných variant byla firmou vybrána varianta senzoru CL-P030. Senzor CL-P030 má sice oproti senzoru CL-P007 větší rozměry, ale také disponuje větší snímací vzdáleností. V rámci testování měřicí aplikace by byl dostačující senzor CL-P007 a nebyla by třeba volit varianta senzoru CL-P030, ale vzhledem k dalšímu využití pro měření jiných velikostí objektů i vyšší variabilitu vybraných dílů a jejich výsledných odchylek je žádoucí využít větší měřicí rozsah. Také je vhodnější i po stránce přesnosti, kde je výrobcem uvedena linearita (přesnost)  $\pm 0,94 \mu\text{m}$  pro senzor CL-P030 a pro CL-P007 je uvedena linearita (přesnost)  $\pm 0,96 \mu\text{m}$ . [40] [50]

### **6.2.9 Pracovní deska pro umístění měřeného dílu**

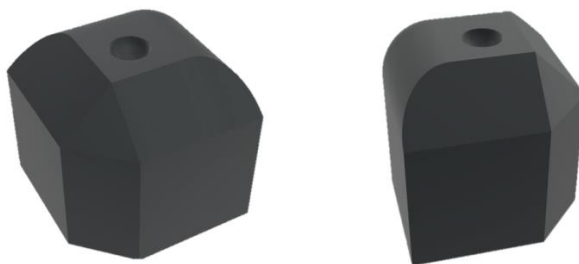
Deska o rozměrech 200x200x20 mm slouží jako „lůžko“ pro měřený díl, na které bude díl uložen v jejím středu za pomoci dvou úchytek.

#### **6.2.10 Kalibrační značky**

Kalibrační značky o výšce 5 mm se umístí na tři ze čtyř rohů pracovní desky dílu. Budou sloužit pro kalibraci senzoru a robotu před každým měřením.

#### **6.2.11 Testovací díl**

Jedná se o testovací kostku (70x70x70 mm) s různým zaoblením a sražením hran (viz příloha), na níž bude senzor najíždět z různých stran a zaznamenávat její tvarové uzpůsobení (viz obr. 30). První kus byl zhotoven na 3D tiskárně, ale je třeba vyrobit detailnější model pro zvýšení přesnosti měření.



Obr. 30) Testovací díl



## 7 NÁVRH A VÝVOJ MĚŘICÍ APLIKACE POMOCÍ SW ROBOTSTUDIO

Návrh měřicí aplikace je proveden v programu RobotStudio, jež zprostředkovává firma ABB pro své zákazníky. Program je určen pro naprogramování, simulace a kontroly robotických pracovišť v digitální podobě. Pracoviště si lze v programu „přichystat“ a následně ho nahrát do reálného kontroléru robotu. Jedná se o vhodné řešení s ohledem na úsporu času a nákladů na chod reálného pracoviště. Tento typ programování je znám jako off-line programování. V rámci zadání diplomové práce bude realizace měřicí aplikace provedena pouze v programu RobotStudio.

První část této kapitoly se bude věnovat potřebným pojmům a ve druhé části se bude jednat o popis tvorby měřicí aplikace.

### 7.1 Souřadný systém robotu

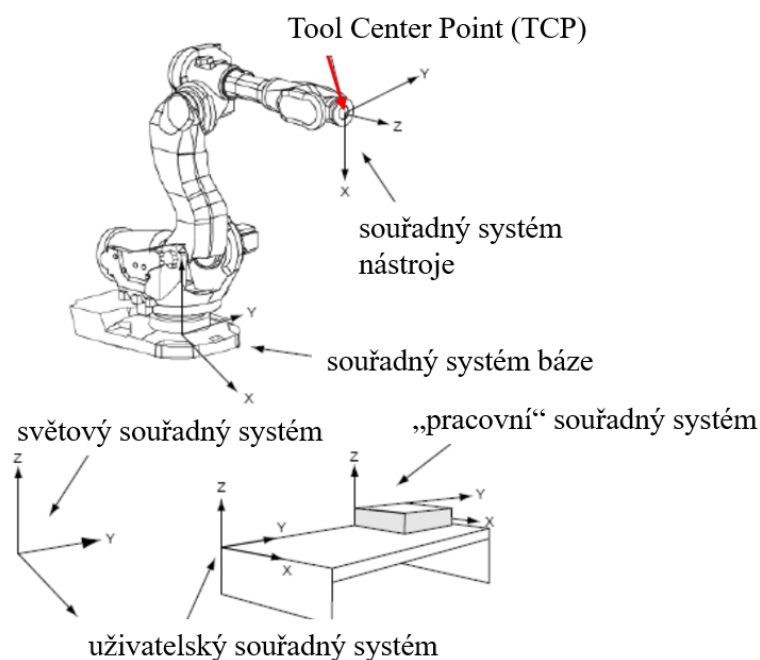
Souřadný systém robotu byl vytvořen, aby zjednodušil práci při tvorbě robotického programu. [26]

- **Osový souřadný systém (joint frame)** – pomocí něho je definováno natočení robotických ramen v kloubech. Poloha koncového bodu (TCP – Tool Centre Point) závisí na jednotlivých úhlových natočeních.
- **Souřadný systém báze (base frame)** – pevně spjatý se základnou robotu, přičemž osa z je vždy orientována kolmo směrem ze základny nahoru. Pro práci v reálném prostředí je potřeba znát polohu koncového bodu vůči zmíněnému souřadnému systému.
- **Souřadný systém nástroje (tool frame)** – počátek se vkládá do potřebného bodu na aktuálním nástroji s orientací, kde osa směřuje ven z nástroje. Orientace může být i libovolná podle potřeby. V případě, kdy není na robotu namontován nástroj, umísťuje se počátek doprostřed příruby.
- **Uživatelský souřadný systém (user frame)** – umísťuje se na počátek operace (paleta apod.) v závislosti na zvolené aplikaci.
- **Světový souřadný systém (world frame)** – definuje ho uživatel podle potřeby a je umístěn na počátku robotické buňky nebo na počátku pojezdové osy (pokud je robot vybaven pojezdem).

#### Kartézské souřadné systémy robotu

Označení souřadných systému se liší v rámci různých výrobců robotů. Zaměření bude na výrobce robotů ABB (viz obr. 31). [26]

- **Světový souřadný systém (World Coordinate System)** – jasně daný hlavní kartézský souřadný systém.
- **Souřadný systém báze (Base Coordinate System)** – kartézský souřadný systém určující polohu konkrétní součásti, palety obrobku aj. vztahující se k Světlovému souřadnému systému. Označení pro ABB se užívá User Coordinate System a Object Coordinate System.
- **Souřadný systém nástroje (Tool Coordinate System)** – kartézský souřadný systém s polohou v TCP.



Obr. 31) Souřadný systém [73]

## 7.2 Programování robotu

Robot lze naprogramovat dvěma způsoby: [26]

- On-line programování, kde obsluha prostřednictvím ovládacího panelu (teach-pendant) ovládá robot v reálném čase (tzv. učí robot pohyby). Obsluha s robotem projede potřebné body a program se dá ihned spustit. Využívá se v případě testování robotu, kalibrace nástroje, servisu či servisnímu zásahu aj.
- Při off-line programování se jedná o jakousi virtuální simulaci pracovního cyklu robotu. Pro danou potřebu slouží program, ve kterém lze programovat za pomoci modelu robotického pracoviště. Program umožňuje uživateli definovat pohyby a dráhu robotu a následně program převést do potřebného programovacího jazyka, nakonec se vygenerovaný off-line program může nahrát do řídicí jednotky robotu. V případě robotu od ABB se jedná o program RobotStudio s programovacím jazykem RAPID. Off-line programování je přesnější a s jeho pomocí lze vytvořit celý pracovní program robotu bez zásahu do skutečné výroby.

Dále se práce omezí na off-line programování a seznámení se s prostředím SW RobotStudio.

## 7.3 Program RobotStudio

V této kapitole jsou definovány potřebné instrukce na tvorbu programu pro měřicí aplikaci. Instrukce se zadávají pomocí programovacího jazyka RAPID od firmy ABB.

### 7.3.1 Potřebné instrukce

- **Speed Data** – používají se k určení rychlosti, kterou se robot a jeho osy budou pohybovat (viz tab 7). Definují rychlost: [74]
  - Ve které se pohybuje středový bod nástroje;



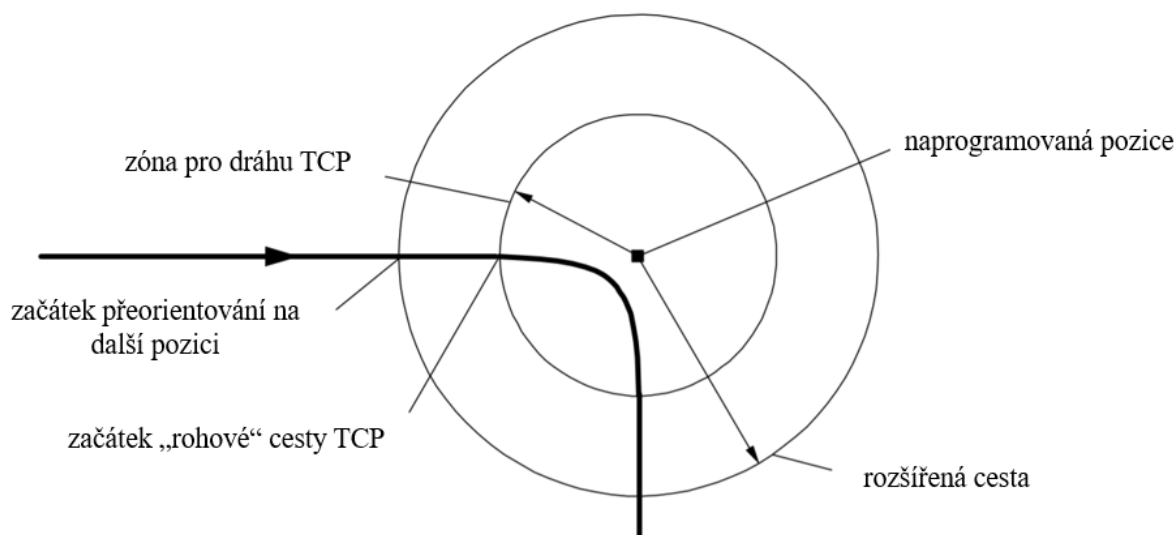
- změny orientace nástroje;
- při kterých se osy (lineární, rotující) pohybují.

V případě kombinování několika typů pohybů, jeden pohyb omezuje veškeré pohyby. Dojde ke snížení rychlosti tak, aby všechny pohyby skončily současně. Rychlost závisí i na výkonu robotu. [74]

Tab 7) Příklady rychlosti [74]

Název	TCP rychlost	Orientace	Lineární ext. osy	Rotační ext. osy
v5	5 mm/s	500 °/s	5000 mm/s	1000 °/s
v10	10 mm/s	500 °/s	5000 mm/s	1000 °/s
v20	20 mm/s	500 °/s	5000 mm/s	1000 °/s
v100	100 mm/s	500 °/s	5000 mm/s	1000 °/s
v200	200 mm/s	500 °/s	5000 mm/s	1000 °/s
v500	500 mm/s	500 °/s	5000 mm/s	1000 °/s
v1000	1000 mm/s	500 °/s	5000 mm/s	1000 °/s
v1500	1500 mm/s	500 °/s	5000 mm/s	1000 °/s
v2000	2000 mm/s	500 °/s	5000 mm/s	1000 °/s

- **Zone Data** – definuje, v jaké vzdálenosti má být ukončena pozice robotu, popřípadě v jaké vzdálenosti má bod projet. Pokud se jedná o bod zastavení, musí robot dosáhnout zadaného bodu. Pro tento případ se volí Zone Data – fine. Jedná-li se o „průletový bod“ s definovanou zónou, robot tímto bodem neprojde (viz obr. 32) a Zone Data se volí podle tabulky (viz tab. 8). [74]



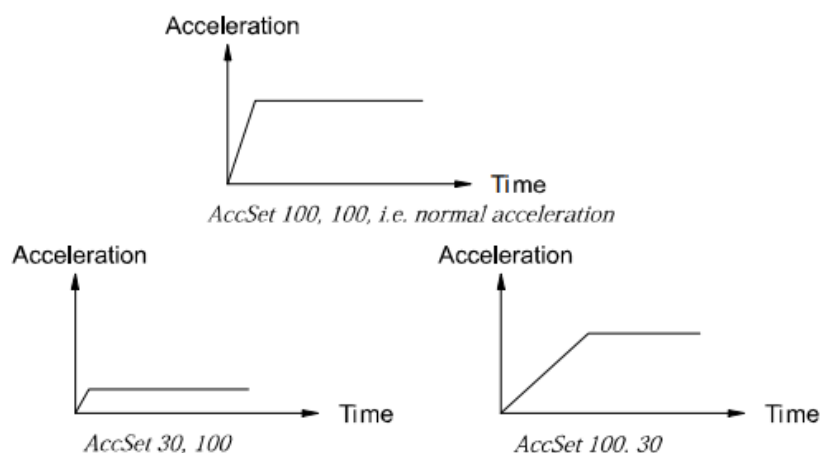
Obr. 32) Definování zóny [74]

Velikost zvolené zóny nesmí překročit polovinu vzdálenosti od předešlého bodu. Pokud je zadaná zóna větší, robot si ji sám zmenší. [74]

Tab 8) Zóny [74]

„Path Zone“				Zone		
Název	TCP cesta	Orientace	Ext. osa	Orientace	Lineární axis	Rotační osa
z0	0,3 mm	0,3 mm	0,3 mm	0,03 °	0,3 mm	0,03 °
z1	1 mm	1 mm	1 mm	0,1 °	1 mm	0,1 °
z5	5 mm	8 mm	8 mm	0,8 °	8 mm	0,8 °
z10	10 mm	15 mm	15 mm	1,5 °	15 mm	1,5 °
z15	15 mm	23 mm	23 mm	2,3 °	23 mm	2,3 °
z20	20 mm	30 mm	30 mm	3,0 °	30 mm	3,0 °
z30	30 mm	45 mm	45 mm	4,5 °	45 mm	4,5 °
z40	40 mm	60 mm	60 mm	6,0 °	60 mm	6,0 °
z50	50 mm	75 mm	75 mm	7,5 °	75 mm	7,5 °
z60	60 mm	90 mm	90 mm	9,0 °	90 mm	9,0 °
z80	80 mm	120 mm	120 mm	12 °	120 mm	12 °
z100	100 mm	150 mm	150 mm	15 °	150 mm	15 °
z150	150 mm	225 mm	225 mm	23 °	225 mm	23 °
z200	200 mm	300 mm	300 mm	30 °	300 mm	30 °

- **AccSet (omezení zrychlení)** – slouží pro snížení chybovosti dráhy robotu, plynulejšímu chodu. Umožňuje pomalejší zrychlení a zpomalení (viz obr. 33). Využívá se například při manipulaci s náchylnými předměty na poškození. [74]
  - **Syntax:** AccSet <číslo>, <číslo>

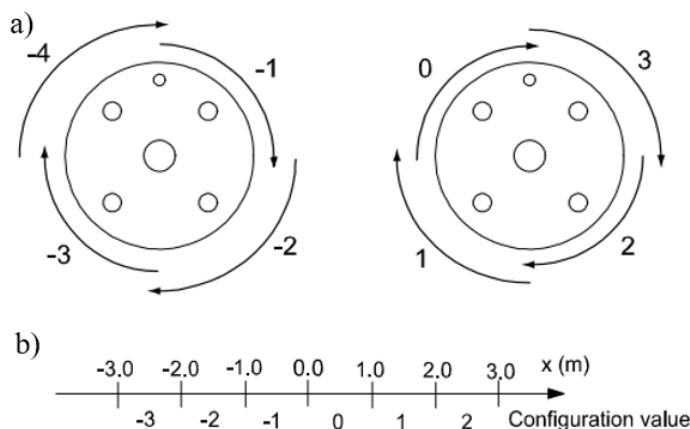


Obr. 33) Příklady akcelerace [74]

- **Tool Data** – definují souřadný systém nástroje a další charakteristiky. Používají se k popisu vlastností nástroje. Vlastnosti jsou orientace, poloha, středový bod (TCP) a fyzikální charakteristiky nástroje. [74]
- **Robot configuration data** – využívají se k definování os robotu. V případě rotačních os je konfigurace zadávána pomocí čtyř hodnot os.

Osy definují kvadranty 0, 1, 2, 3 a -1, -2, -3, -4 (viz obr. 34 a). Číslo kvadrantu je spojeno s aktuálním úhlem osy. Kvadranty jsou v rozmezí 90°. Pokud se jedná o lineární osy měřicí interval je definován pomocí metrů (viz obr. 34 b). [74]

V případě, kdy dojde k změně konfigurace mezi dvěma body, je třeba ověřit, zda je robot schopen dráhu dojet. Pokud robot dráhu neprojde, zastaví se a je třeba zvolit jinou konfiguraci os. [74]

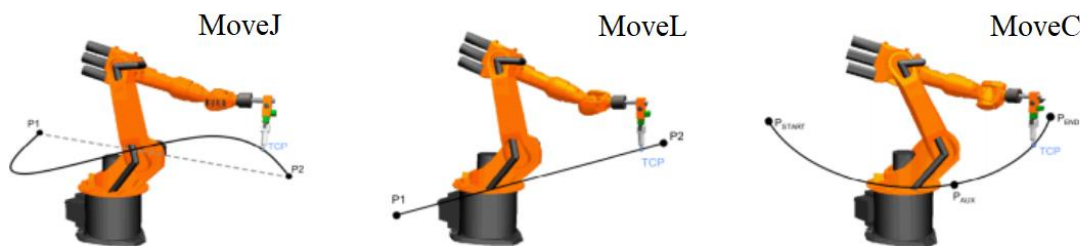


Obr. 34) Konfigurace a) rotačních os; b) lineárních os [74]

- **WobjData (Work Object)** – definuje polohu uživatelského souřadného systému. Používá se k popisu „pracovního“ objektu robotu. Výhoda nastává v případě přesunutí „pracovního“ objektu, kdy dojde k přesunu i dílčích bodů vytvořených na tomto objektu. [74] [26]
- **Robtarget (Robot target/Position Data)** – bod, který definuje polohu robotu v prostoru (teach-point). [74]
- **Jointtarget (Joint Position Data)** – používá se k definování polohy os robotu a vnějších os v případě pohybu MoveAbsJ. [74]

### 7.3.2 Hlavní typy pohybů

- Obecný pohyb (**MoveJ** – joint move) – nastává v případě nastavení pohybu robotu z bodu P1 do bodu P2 nejrychlejší cestou. Po zadání příkazu není dráha do poslední chvíle známá a nemusí se jednat o přímku ani nejkratší vzdálenost. Jelikož jsou pohyby os rotační není přímka pro rychlost vhodná a robot volí zakřivené pohyby. Používá se převážně jen pro pomocné polohování, kde je potřeba vyšší rychlosti a v místech, ve kterých nemůže dojít ke střetu s jiným objektem. [26]
- Lineární pohyb (**MoveL** – linear move) – dodržuje přímou cestu mezi zadanými body P1 a P2 a pohybuje se danou konstantní rychlostí. [26]
- Kruhový pohyb (**MoveC** – circular move) – koncový bod robotu (TCP) definovaný přesnou konstantní rychlostí (mm/s) opisuje kruhovou dráhu z počátečního bodu (P<sub>START</sub>) do bodu konečného (P<sub>END</sub>) přes bod (P<sub>AUX</sub>). Kruhový pohyb je určen těmito zmíněnými třemi body (viz obr. 35). [26]
- Obecný pohyb absolutní (**MoveAbsJ** – Move Absolut Joint) - popisuje pohyb robotu a jeho externích os do absolutní polohy. Pohyb do cílového bodu je nelineární a všechny osy robotu se do cílové polohy dostanou současně. [74]



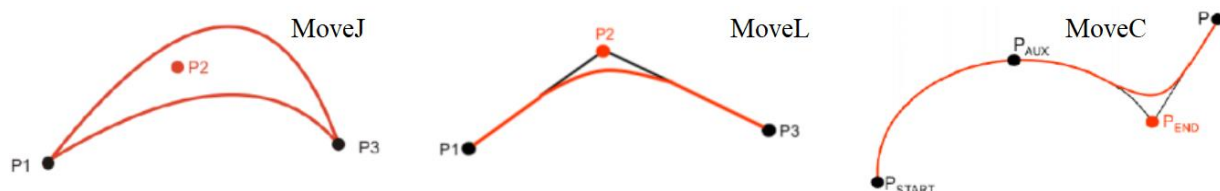
Obr. 35) Typy pohybů [75]

### Aproximace pohybů

V případě použití robotu v praxi, může nastat situace, ve které základní typy pohybů budou nedostačující, z těchto důvodů se využívá aproximace. V případě aproximace TCP robotu nenajíždí do požadovaného bodu, a tím se dráha stává plynulejší a rychlejší, oproti předešlým pohybům, kde se v počátečním a konečném bodě robot téměř zastaví (rychlost a zrychlení se blíží nule). Aproximace se tedy využívá pro zefektivnění pracovního cyklu (viz obr. 36). [26]

Existují tři druhy aproximace vycházející z předešlých pohybů: [26]

- Aproximace obecného pohybu – TCP robotu jede po dráze směřované do bodu P2, ale před tímto bodem se odpojí a pokračuje až do bodu P3 nejkratší cestou. Opět se dráha předem nedá předvídat.
- Aproximace lineárního pohybu – TCP robotu jede po dráze k bodu P2, tento bod objíždí a pokračuje do dalšího bodu P3 nejkratší cestou.
- Aproximace kruhového pohybu – TCP robotu jede po dráze k bodu P2, tento bod objíždí a pokračuje do dalšího bodu P3 nejkratší cestou.



Obr. 36) Aproximace pohybů [26]

## 7.4 Zadání měřicí aplikace

Zadáním práce bylo navržení měřicí aplikace pomocí konfokálního senzoru a robotického ramene. V rámci zadání budou vytvořeny tři varianty, ze kterých se následně vybere nejvhodnější.

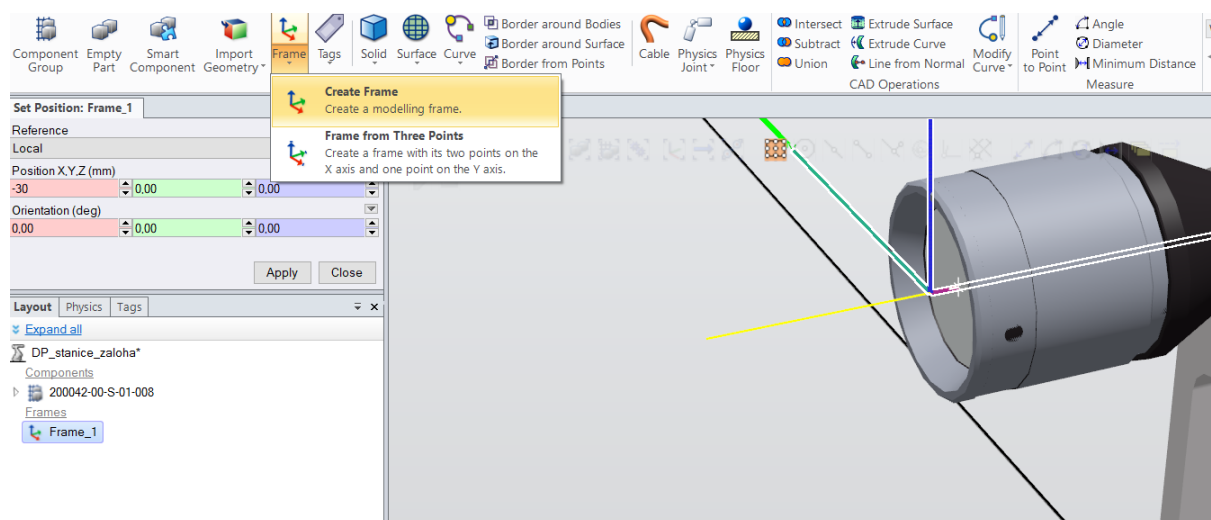
Jako první bod je třeba vytvořit robotickou buňku se senzorem a měřeným dílem. Robot se umístí na plochu, k tomu určenou, uvnitř buňky. Na robotu je třeba umístit přírubu s konfokálním senzorem, který bude mít vlastní TCP bod pro měření. Do prostoru robotu na desku buňky vložit desku pro měřený přípravek o rozměrech 200x200x20 mm, na niž dále budou umístěny kalibrační značky (kvádry s výškou 5 mm) a uprostřed desky měřený díl. Pomocí kalibračních značek je třeba vytvořit „Frame“, který bude patřit desce společně s kalibračními značkami a měřeným dílem – přípravek. Po přípravných úkolech následuje kalibrace a samotná měřicí aplikace. Ta bude zajištěna pomocí čtrnácti bodů umístěných na měřeném dílu. Robot je třeba naprogramovat efektivně, bez kolizí, s nejvhodnější cestou tak, aby proces kalibrace a měření byl splněn do času 20 s.

## 7.5 Realizace měřicí aplikace

Prvním krokem je do programu RobotStudio nahrát robotickou buňku a z knihovny vybrat vhodný robot. Vybraným robotem je IRB 1200-5/0.9 standart. Po vložení robotu do prostoru je připojen controller s verzí RobotWare 6.11.02.00 a aktivován. Pomocí vytvoření „frameStul“ na desce pro polohu robotu je robot přesunut z jeho výchozí pozice na požadovanou pozici.

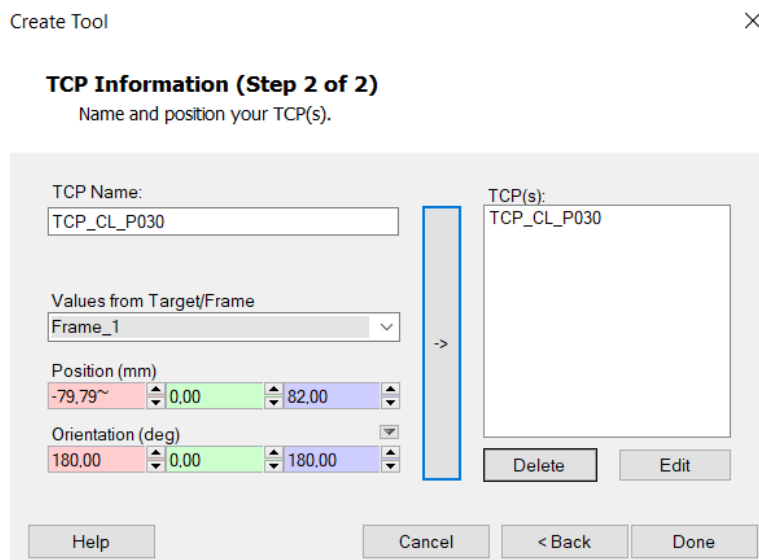
### 7.5.1 Naučení TCP konfokálního senzoru

Pomocí ikonky „import Geometry“ je nahrán konfokální senzor s přírubou ve formátu .STP. Pro vytvoření TCP bodu je třeba nejprve vytvořit „frame“ senzoru v místě středu čočky a následného odsazení „frame“ o vzdálenost čočky od kraje senzoru a výrobcem předepsanou snímatelnou vzdáleností. Zde je třeba „frame“ ještě správně natočit v lokálních souřadnicích kolem osy  $x$  a  $y$  o  $90^\circ$  (viz obr. 37).



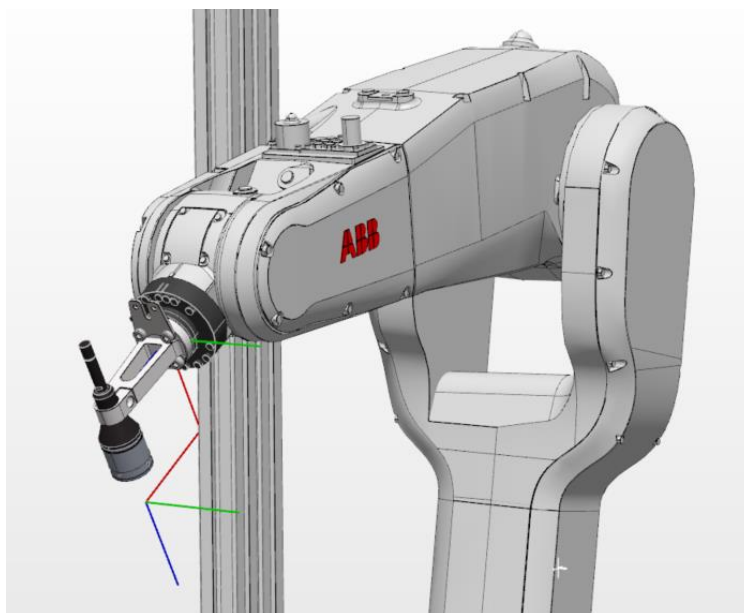
Obr. 37) Vložení frame

Následně je senzor definován jako nástroj za pomoci ikony „Create Tool“ pod názvem CL-P030. Zde se vybere senzor jako nástroj a následně se nastaví vytvořený „frame“ jako TCP bod senzoru pod názvem TCP\_CL\_P030 (viz obr. 38).



Obr. 38) Výběr TCP bodu

Posledním krokem k celkovému nastavení senzoru je připojení senzoru s přírubou k robotu. Tento úkol lze provést dvěma způsoby – přetažením nástroje na robot, nebo pomocí výběru z nabídky „Attach to“ připojit senzor k robotu. Po všech krocích je finální nástroj připraven pro měření (viz obr. 39).



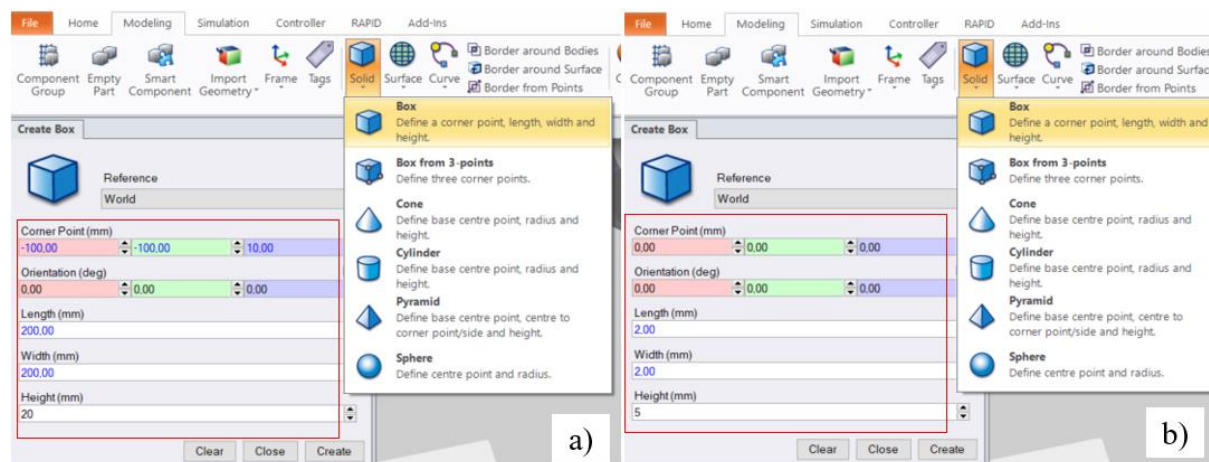
Obr. 39) Vložení nástroje na robot

### 7.5.2 Naučení frame měřicího přípravku

Prvním bodem pro vytvoření „frame přípravku“ je určení pozice pro desku pomocí pomocného „framePomocny“. Následuje vytvoření desky o rozměrech 200x200x20 mm, na které bude ve středu umístěn testovací díl (viz obr. 40 a). Díl bude na desce zajištěn pomocí dvou úchytek.

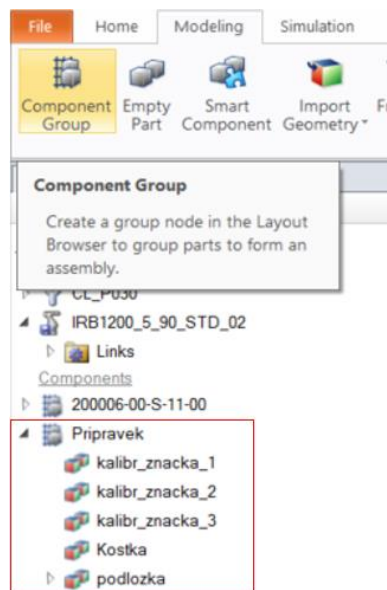
Pomocí přetažení nebo povelu „Attach to“ se deska přenesse na „framePomocny“. Dále na ni může být umístěn testovací díl.

Pro simulaci kalibrace a vytvoření „frame přípravku“ se vytvoří tři kalibrační značky o rozměrech 2x2x5 mm a umístí na kraje desky stejným způsobem (viz obr. 40 b).



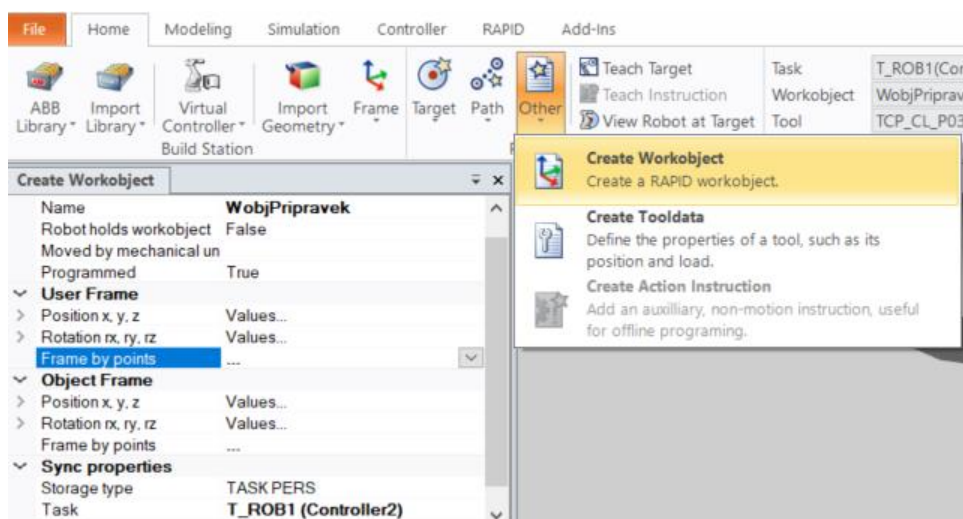
Obr. 40) Vložení přípravků: a) vytvoření desky; b) vytvoření kalibračních značek

Aby nedocházelo k rozhození dílčích komponent, je vhodné vytvořit skupinu pomocí ikony „Component Group“ a vložení všech komponent do vytvořené skupiny (složky) Přípravek (viz obr. 41).



Obr. 41) Vytvoření skupiny

Další krok spočívá ve vytvoření „frame přípravku“, aby se s celým přípravkem dalo snadno manipulovat v případě potřeby. Namísto vytvoření dalšího „frame“ jako u předešlých operací, je třeba vytvořit „Workobject“ pro přípravek. Dráhy, které se budou v rámci „Workobjectu“ vytvářet nebudou ovlivňovány změnou polohy a nedojde k rozhození měření, což je žádoucí. V rámci vytvoření „Workobjectu“ se vytvoří za pomoci tří kalibračních značek „frame přípravku“ (frame pomocí tří bodů) značený jako „WobjPřípravek“ (viz obr. 42).

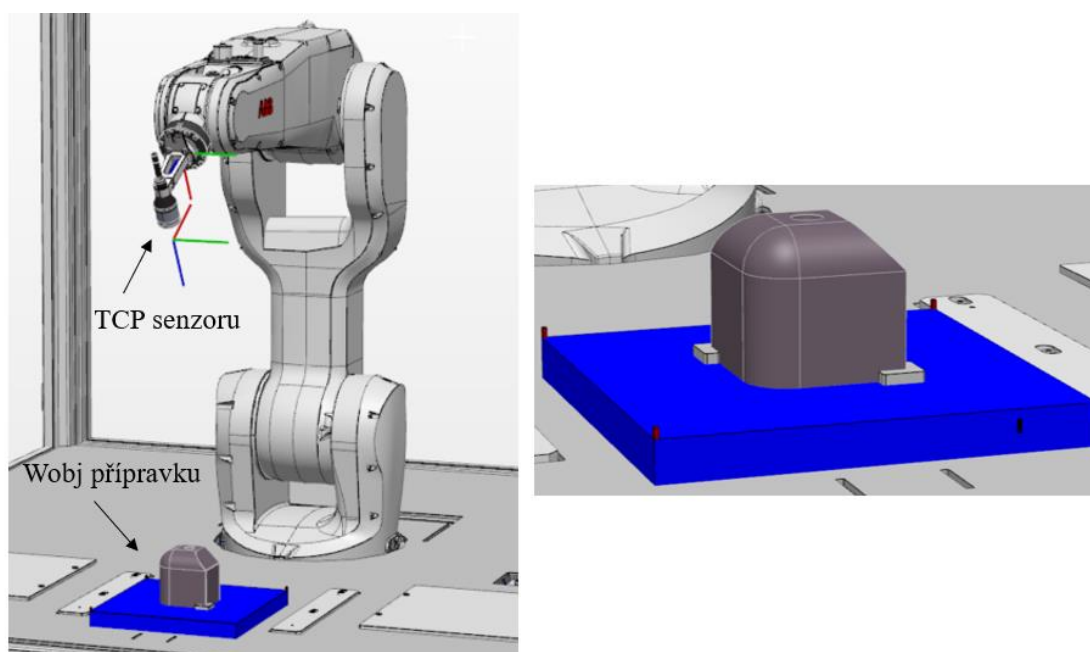


Obr. 42) Vytvoření Workobjectu

K zamezení již zmíněného rozhození operace, se přichytí „WobjPřípravek“ ke skupině „Přípravek“. Kalibrační značky slouží jako kalibrace robotu a senzoru před měřením tak, že se senzor pomocí nich zorientuje v prostoru (podmínkou je díl umístěný vždy uprostřed lůžka). Také se ověří, zda jsou naměřené hodnoty správné.



Po provedení veškerých operací dostává pracovní prostor finální podobu, ve které je připraven pro kalibraci a samotné měření (viz obr. 43). (Dále v práci bude uchycení dílu zanedbáno pro větší přehlednost).

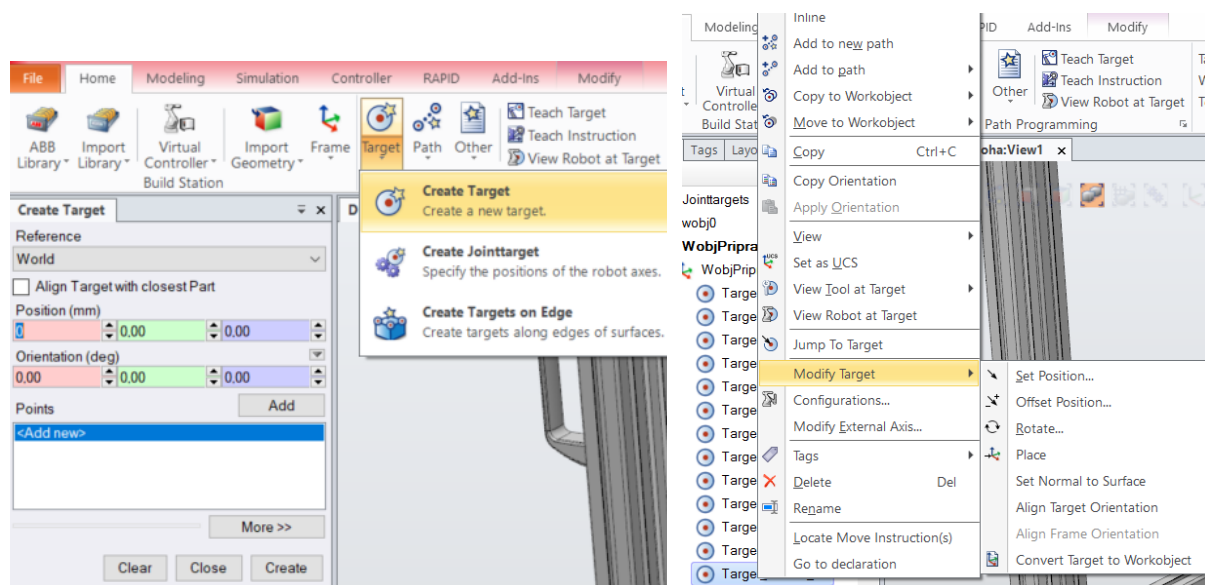


Obr. 43) Připravené pracoviště

### 7.5.3 Tvorba bodů pro kalibraci a měření

Jak již bylo zmíněno, ke kalibraci slouží kalibrační značky. Pro správný průběh kalibrace je třeba vytvořit body (Targety) na vrchních středech ploch kalibračních značek.

Body neboli Targety se vytvoří pomocí funkce „Create Target“ (viz obr. 44 a). Tímto způsobem lze vytvořit potřebné body, do kterých bude robot najíždět. U veškerých vytvořených bodů musí jejich lokální osa z směřovat kolmo k objektu, který bude měřen. Toho se dá dosáhnout pomocí instrukce „Modify Target“, kde je možné bod natočit nebo posunout podle potřeby (viz obr. 44 b).

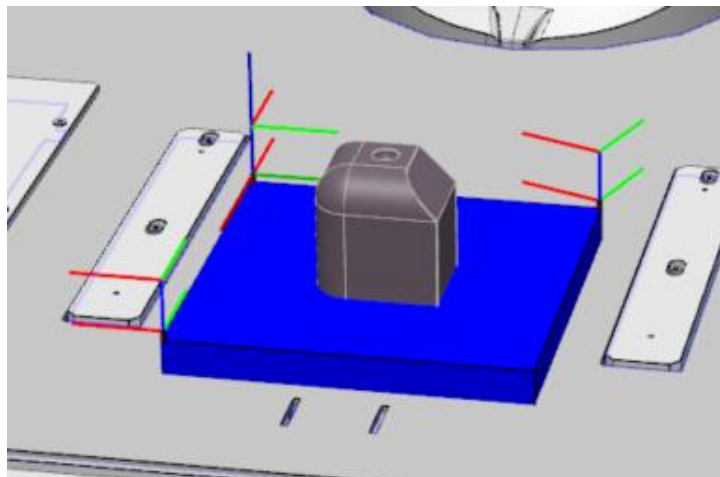


Obr. 44) a) Vytvoření Target; b) úprava Targetů



Body pro kalibraci by měly být doplněny o body nájezdu a výjezdu z kalibračních značek. Tímto se definuje trajektorie robotu a předejde se možné a nechtěné kolizi s měřeným dílem. Po zadání veškerých bodů (viz obr. 45), které jsou pro cestu robotu potřebné, se může vytvořit samotná cesta.

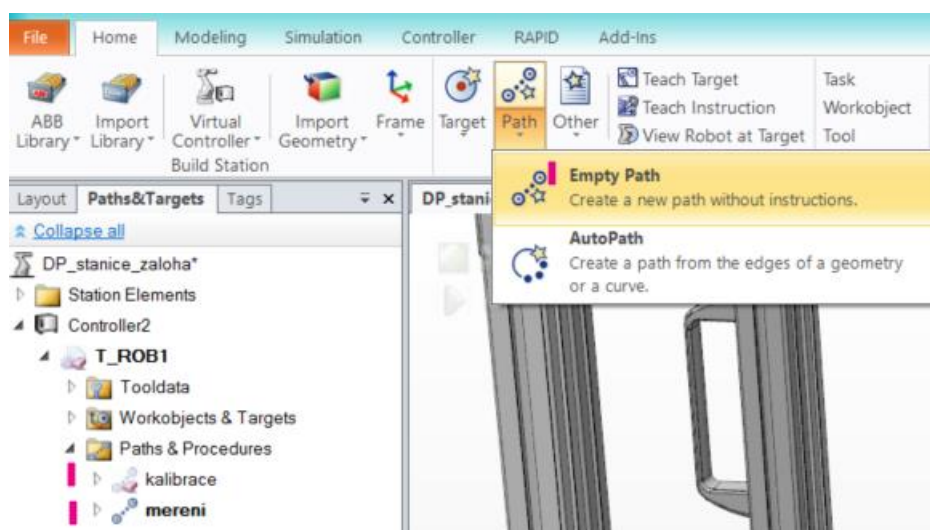
V případě tvorby bodů (Targetů) pro měření je postup stejný. Na měřeném objektu jsou útvary, které je třeba při měření zakomponovat. Body pro měření jsou tedy umístěny na hrany, zkosení, zaoblení, prohloubené místo a stěny dílu. Pro ukázkou měření rovnosti povrchu může být vložena čtveřice (popřípadě trojice) bodů do rohů stěny objektu. Každý bod měření má přiřazen bod nájezdu a výjezdu proto, aby při měření nedocházelo ke kolizi robotu s měřeným objektem. Nyní je možné vytvořit cestu pro robot.



Obr. 45) Kalibrační značky s definovanými body

#### 7.5.4 Definice trajektorií

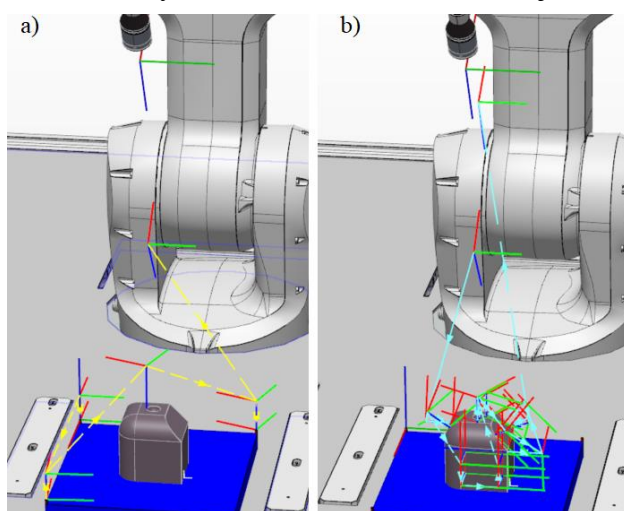
Cesta neboli dráha, kterou bude robot opisovat je třeba vytvořit pro konečnou simulaci celého procesu. Vytvoří se pomocí vkládání jednotlivých Targetů do předpřipravené složky, která definuje danou proceduru. Složka se získá pomocí funkce „Empty Path“ (viz obr. 46). Jelikož jsou přichystány body pro dvě operace, lze vytvořit i dvě samostatné cesty. Tato možnost je přehlednější oproti jedné cestě se všemi body. Jedna cesta patří bodům pro kalibraci a druhá vytvořená cesta patří měření.



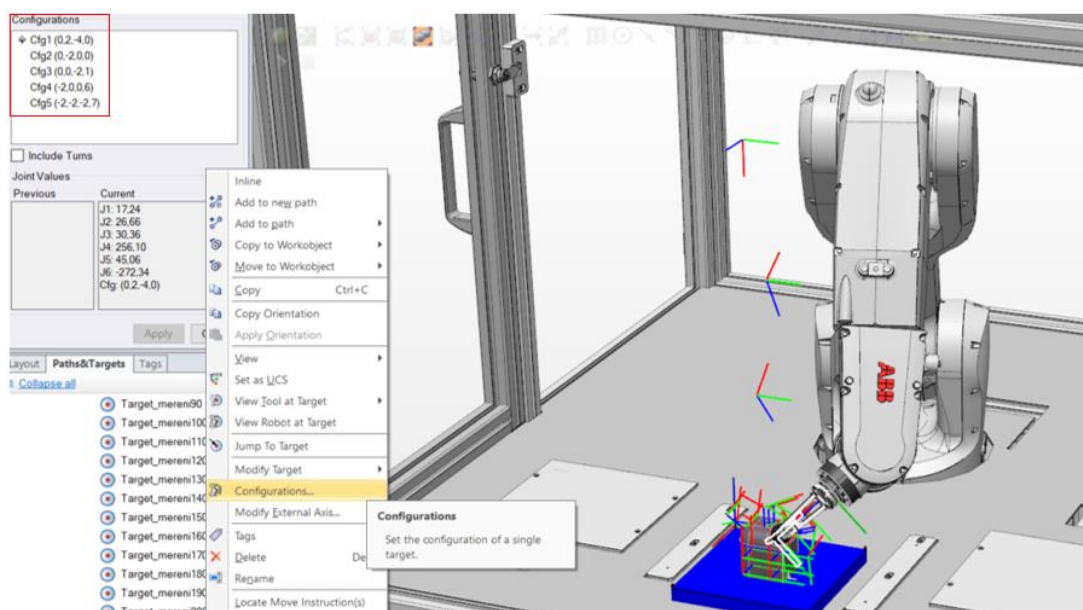
Obr. 46) Vytvoření Empty Path

Postupným vkládáním bodů do příslušných složek *Kalibrace* a *Mereni* se postupně tvoří i spoje mezi jednotlivými body. Je třeba dbát na pořadí při vkládání (vkládání se uskutečňuje pomocí přetažení bodu do složky). Po vložení veškerých bodů včetně nájezdů a výjezdů je potřeba určit typ dráhy robotu, a to MoveJ nebo MoveL. V tomto případě se MoveL vyplatí při najíždění, vyjíždění robotu z bodů a u krátkých částí dráhy mezi jednotlivými body, u zbytku dráhy je vhodnější volit MoveJ.

Pokud jsou dráhy robotu vytvořené (viz obr. 47), je možné je postupně zkusit projet a zjistit, zda je robot schopný najet do každého bodu, bez ohledu na jeho současnou konfiguraci. V případě, kdy je pro robot nemožné do daného bodu dojet je potřeba zkontrolovat konfiguraci v tomto bodě, popřípadě i dalších bodech. Konfiguraci lze změnit, aby byl robot schopen projet všechny body (viz obr. 48). Dalším krokem je nastavit (natočit) orientaci bodů, aby nedocházelo ke zbytečnému otáčení a přetáčení os robotu a jeho zbytečným pohybům, což může být následek změny konfigurace v částech drah. Pokud robot stále přetáčí osy, musí se měnit konfigurace bodů až do ideálního stavu. Celý proces měření by měl být plynulý a bez zbytečných natáčení os robotu, díky tomu se čas měření zredukuje.



Obr. 47) Auto Path: a) kalibrace, b) příklad varianty měření



Obr. 48) Změna konfigurace v bodě

Po dokončení drah robotu následuje synchronizace pracoviště s programem RAPID. Pro uskutečnění tohoto pokynu je potřebná nadřazená procedura s názvem „main“, ta se vytvoří stejně jako předešlé cesty pomocí funkce „Empty Path“. Po vytvoření „main“ se do ní vloží vytvořené cesty kalibrace a měření. V tomto stavu lze synchronizovat. Jakmile se synchronizace dokončí je možné spustit simulaci.

### 7.5.5 Optimalizace rychlosti pohybů a drah

Po synchronizaci s programem RAPID se v této záložce vytvořil textový soubor, který definuje veškeré již naprogramované akce. V RAPIDu jsou v modulu Module1 uloženy vytvořené body, procedury a main program, který tyto procedury volá (cesty „kalibrace“ a „měření“). V tomto modulu se bude dále upřesňovat procedura kalibrace a měření, kde jsou třeba přidělit rychlosti robotu, zóny, časy měření a akcelerace.

Rychlost robotu je definována pomocí „SpeedData“. Rychlosti jsou následující. Při nájezdu na měřicí bod je rychlost definována na v100 (100 mm/s), aby byl nájezd na bod plynulý a co nejpřesnější. Při výjezdu z bodu je rychlost definována na v1000 (1000 mm/s) a u drah mezi nájezdovými a výjezdovými body je definována rychlost v2000 (2000 mm/s).

Zóny pro jednotlivé body robotu jsou definovány pomocí „ZoneData“. Pro body měření je nejvhodnější zóna fine, která zajistí nájezd přesně na bod a zastavení v tomto bodě tzv. Stop point. Pro další body toto není potřebné, tudíž se uplatní tzv. Fly-by points. V tomto případě robot pouze projede kolem bodu a typ zóny určuje s jakou vzdáleností (poloměrem). Nájezdové body jsou definovány se zónou z1 (1 mm), výjezdové body jsou definovány se zónou z5 (5 mm) a body v čekací pozici jsou definovány se zónou z50 (50 mm), tam není třeba tak velké přesnosti.

V místě bodu určeného pro měření je potřeba zadat čas, za který konfokální senzor naměří potřebnou hodnotu. Proto je za body pro měření vložena instrukce „WaitTime“. Jedná se o povel, který určuje robotu, jak dlouho má na dané pozici čekat, než pojedou na následující bod. Tuto instrukci je vhodnější doplnit o instrukci „WaitRobInPos“, sloužící k ustálení robotu. Pokud instrukce nebude součástí programu může docházet k nežádoucím varováním.

Aby docházelo k plynulému pohybu robotu a nebyl zbytečně vytěžován lze upravit jeho akceleraci. Díky změně hodnot lze měnit jeho zrychlení. Změny se projeví i na celkovém čase operace (viz tab. 9). Akcelerace se dá pozměnit pomocí instrukce „AccSet“.

Tab 9) Vliv změny akcelerace na čas simulace

Hodnota AccSet	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
<b>100, 100</b>	16,9	17,4	17,7
<b>30, 30</b>	21,9	22,8	23,2
<b>90, 30</b>	18,1	18,6	19,0
<b>90, 40</b>	17,7	18,2	18,9
<b>100, 20</b>	18,4	18,9	19,2
<b>100, 30</b>	17,8	18,3	18,7

V tabulce lze vidět, že nejvhodnější hodnota akcelerace je AccSet 90, 40 nebo 100, 30.

Nakonec z původní hodnoty AccSet 100, 100 byla pro tuto operaci zvolena hodnota akcelerace AccSet 90, 40. Robot tak získá pomalejší a plynulejší rozjezd v čase a motory a brzdy nebudou natolik zatěžovány.

#### Kód v programu RAPID:

- Příklad zadaného bodu v RAPIDu (viz obr. 49, obr. 50):

```
CONST robtarget Target_140:=[[74,124,45],[0.5,0.5,-0.5,0.5],[0,0,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
```

Diagram showing the structure of the `robtarget` data type with arrows pointing from the code to labels:

- `Target_140`: název bodu
- `[74,124,45]`: poloha vzhledem k základně robotu
- `[0.5,0.5,-0.5,0.5]`: orientace vzhledem k základně robotu
- `[0,0,-1,0]`: konfigurační data robotu
- `[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]`: pozice externích os

Obr. 49) Zadaný samostatný bod

```
MoveL Target_Kalibrace10,v1000,z5,TCP_CL_P030\WObj:=WobjPripravek;
```

Diagram showing the structure of the `MoveL` instruction with arrows pointing from the code to labels:

- `MoveL`: druh pohybu
- `Target_Kalibrace10`: název bodu
- `v1000`: rychlost
- `z5`: zóna
- `TCP_CL_P030`: nástroj
- `WObj:=WobjPripravek`: workobject

Obr. 50) Instrukce bodu

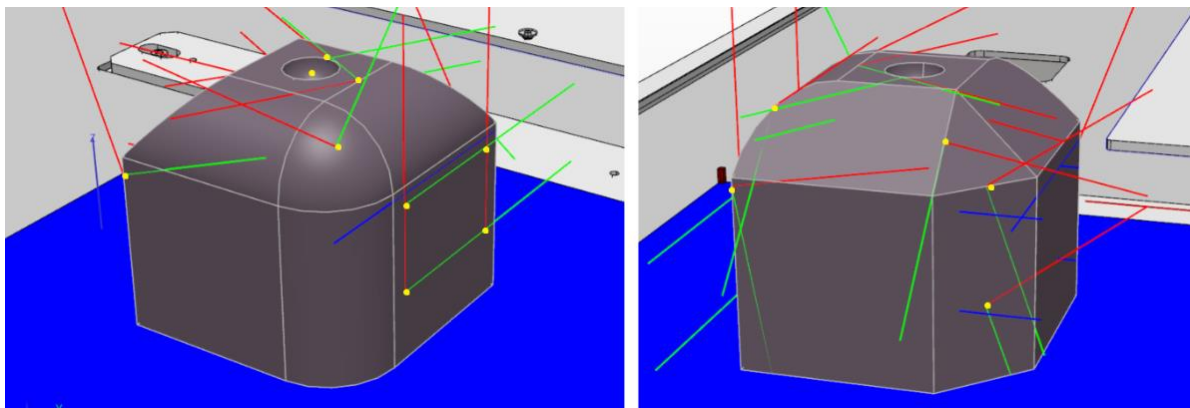
- Příklad main struktury (viz obr. 51):

```
PROC main()
  AccSet 90,40; !omezení zrychlení
  kalibrace;
  mereni;
ENDPROC
```

Obr. 51) Ukázka main struktury

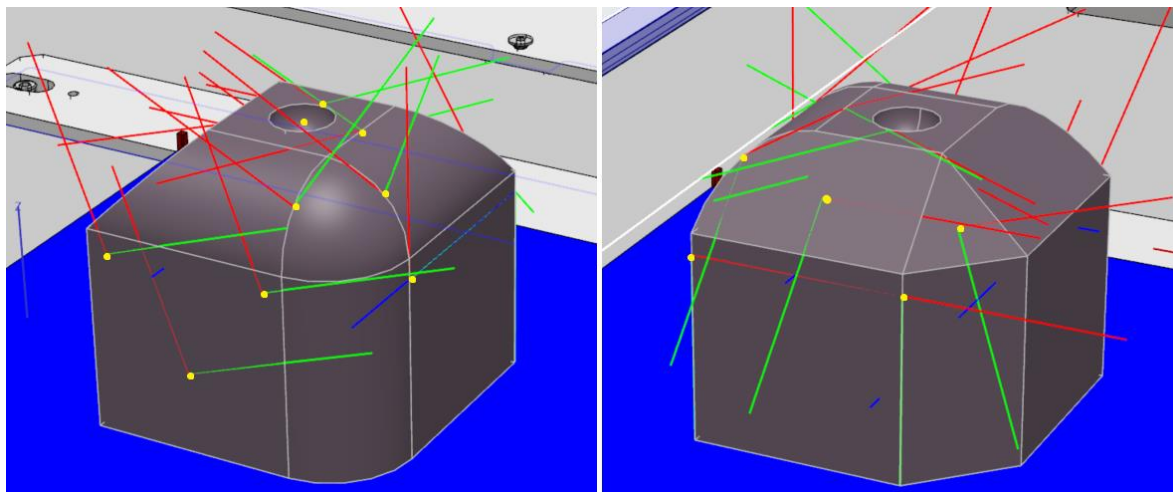
## 7.6 Vytvořené varianty měření

U první varianty byly body přiřazeny na místa, která ověřují správné polohy hran, zaoblení a rovnosti strany dílu (viz obr. 52). Body mohou být uloženy přímo na hranách a koncích stěn, díky konfokální metodě měření, což také firma Keyence uvádí. Další body měří polohu prohloubení a jeho poloměr. Rovnost dílu se ověří za pomoci čtyř bodů rozmístěných na jedné stěně směřující od robotu. Simulace se časově dostává na hodnotu 17,7 – 18 s v případě akcelerace AccSet 90, 40.



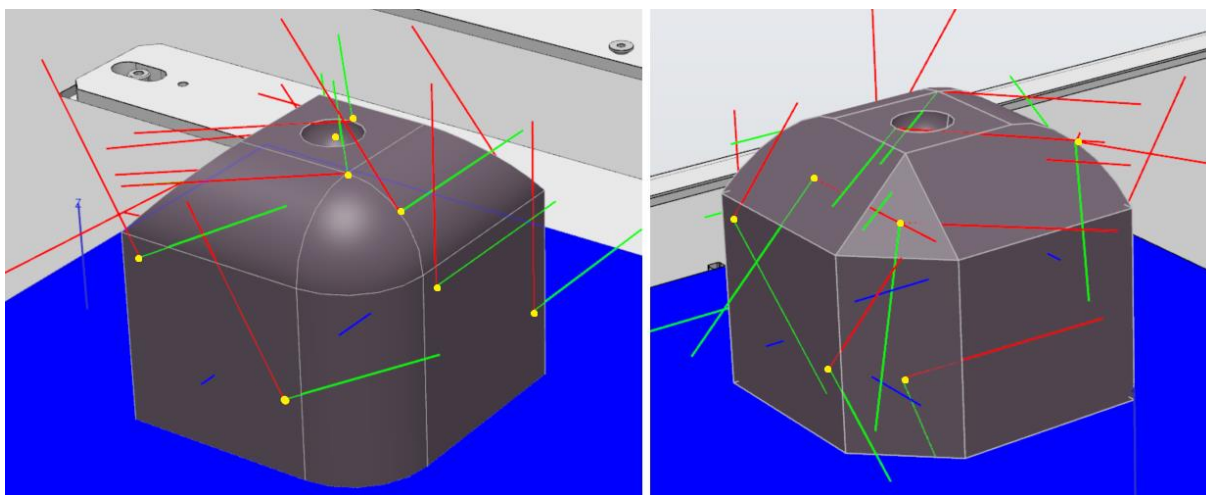
Obr. 52) Rozložení bodů ve variantě 1.

U varianty číslo dvě jsou body rozloženy především do prostoru stěn pro ověření zkosení a zaoblení, avšak u těchto bodů může následně scházet informace o správné poloze dílu. Ta je ale kompenzována dalšími umístěnými body na hranách (viz obr. 53). Zde je využito měření kontrolou rovnosti strany ve formě tří bodů. Další body slouží pro kontrolu hloubky prohloubení i s jeho poloměrem. Celkový čas simulace v případě akcelerace AccSet 90, 40 se dostává na 18,2 s.



Obr. 53) Rozložení bodů ve variantě 2.

V poslední variantě jsou body rozmístěny hlavně po stranách dílu, pro ověřování správného uložení přes rovnost a kolmost (viz obr. 54). Dále pak také nastává ověření šikmých stěn, hloubky prohloubení a poloměru prohloubení. Tato varianta neměří hrany zkosení, ale pouze zaoblené hrany. Dráhy jsou uzpůsobeny tak, aby byly body měřeny od spodní hrany po vrchní hranu.



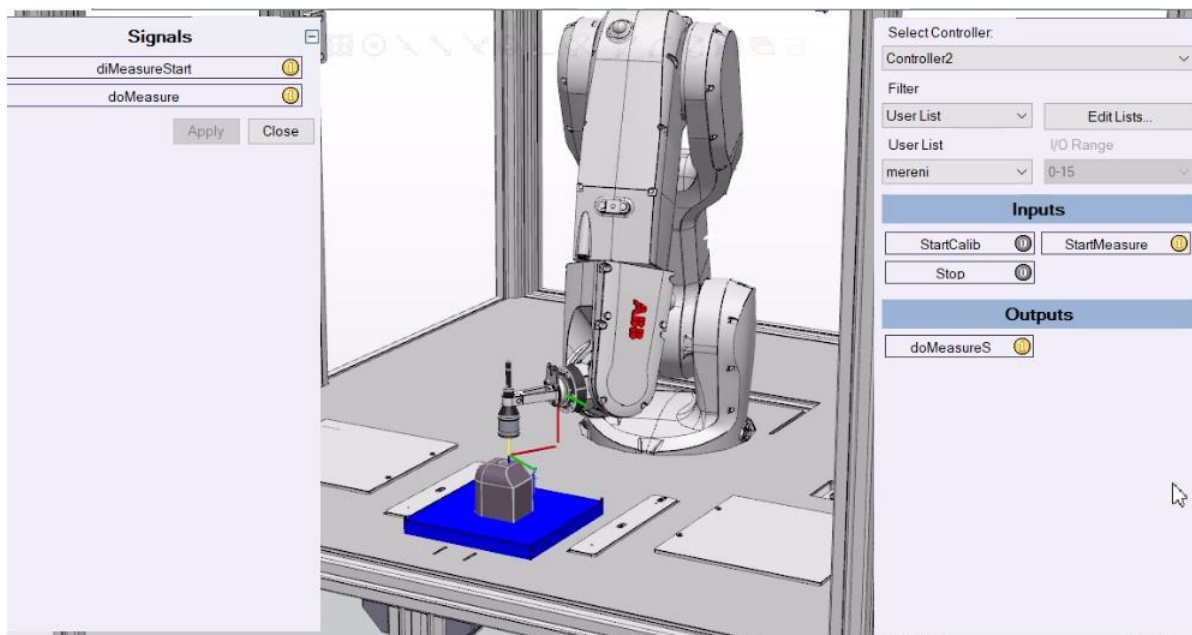
Obr. 54) Rozložení bodů ve variantě 3.

### 7.6.1 Doplnění simulace

Pro lepší představu je simulace, nad rámec požadavků firmy, doplněna o signály, které simulují kontrolku měření (viz obr. 55). Měření je tak doprovázeno světelným signálem při najetí do každého bodu měření. Ke konfokálnímu senzoru byl přidán „senzor“ z nabídky RobotStudio, který zaznamenává přítomnost objektu v jeho TCP bodě.



Dále byla simulace doplněna o signály spuštění kalibrace, měření a možného zastavení v jakékoliv pozici robotu a opětovného rozjetí (viz obr. 55). Signály jsou tvořeny v kontroléru robotu a jejich povely doplněny pomocí logiky do main v RAPIDu.



Obr. 55) Signály simulace

V této kapitole byla popsána tvorba měřicí aplikace pomocí programu RobotStudio podle požadavků, které byly zadány firmou. Byly vytvořeny tři varianty, pro výběr optimálního měření. Veškeré body byly splněny a všechny měření se podařilo uskutečnit do času 20 s. Konečný celkový čas simulace, ve které je zahrnuta kalibrace senzoru s robotem i měření dílu, se pohybuje kolem cca 18 s.

Před nahráním do reálného kontroléru robotu je potřeba vyřešit otázku kalibrace senzoru, robotu a jejich sestavy, která bude předcházet každému měření. Dále je také třeba vyřešit míru přesnosti a opakovatelnosti robotu a sestavy. Tyto aspekty budou rozebírány v dalších kapitolách společně s naznačením jejich možného řešení.

## 8 KALIBRACE ROBOTU A MĚŘÍCÍHO SENZORU

V této kapitole se práce zaměří na samostatnou kalibraci robotu, konfokálního senzoru a na kalibraci celé sestavy.

### 8.1 Kalibrace robotu pomocí manuálu od ABB

Geometrické rozměry a mechanické charakteristiky patřící robotu jsou popisovány pomocí fyzikálních veličin, které spadají do souboru metod a technik – kalibrace. Kalibrace se provádí především z důvodu získání vyšší přesnosti, respektive opakovatelnosti robotu. [76]

Každý robot má přesně daný postup kalibrace případně synchronizace vlastním výrobcem. V tomto případě se jedná o kalibraci popsanou v manuálu řady robotů IRB 1200. V manuálu lze dohledat potřebné informace i pro montáž, údržbu, další připojování k řídicí jednotce, práce pomocí FlexPendantu aj.

Nyní budou pomocí tohoto manuálu definovány pojmy potřebné pro kalibraci k pochopení problematiky kalibrace robotu.

Tab 10) Pojmy [70]

Pojem	Definice
Synchronizační poloha	Známa poloha robotu, ve které lze natočení os robotu porovnat se synchronizačními ryskami.
Kalibrační poloha	Známa poloha pro kalibraci robotu.
Standardní (klasická) kalibrace	Souhrnný pojem pro metody kalibrace.
„Fine“ kalibrace	Metoda kalibrace, která generuje novou nulovou polohu robotu.
Referenční kalibrace	Metoda kalibrace pro již vybavený robot, slouží i pro re-kalibraci.
Aktualizace počítadla otáček	„hrubá“ kalibrace os robotu.
Synchronizační značky	Viditelné značky na osách robotu, slouží k uvedení do synchronizační polohy.

Tab 11) Typy kalibrace [70]

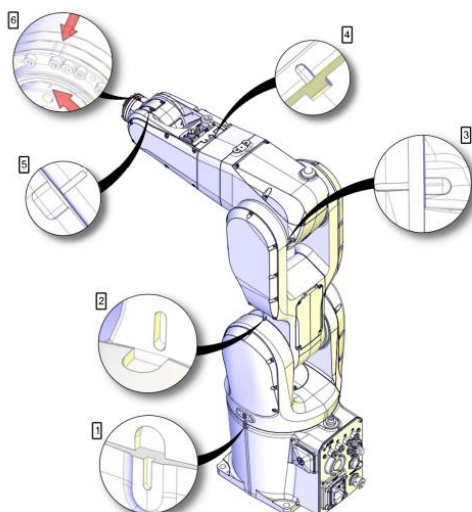
Typ kalibrace	Popis	Kalibrační metoda
„standardní“ kalibrace	robot je na kalibrační (synchronizační) pozici	kalibrace os manuální kalibrace
Absolutní kalibrace	kalibrace se zaměřuje na přesnost polohování v kartézském souřadném systému	CalibWare

#### 8.1.1 Kalibrace os robotu

Jedná se o nejpresnější metodu ze standardní kalibrace pro IRB 1200. Spadají pod ní operace typu jemná kalibrace (fine calibration), aktualizace počítadla otáček (update revolution

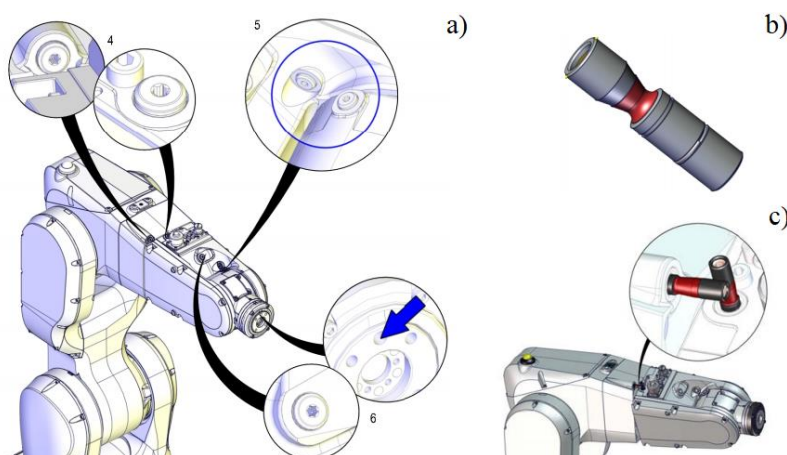
counters) a referenční kalibrace (reference calibration). Fine Calibration se používá v případě, kdy na robotu nejsou žádné nástroje, kabeláž a podobně. V případě, kdy je robot již vybaven, se používá Reference calibration. [70]

Před samotnou kalibrací robotu je třeba robot synchronizovat. Tato metoda souží pro kalibraci počítadla otáček. Synchronizují se osy robotu pomocí vyznačených kalibračních rysek (synchronizační značky) (viz obr. 56). Odměrování nezajišťují klouby robotu, ale jeho motor tak, že se přepočítávají převodové poměry. Po najetí os na rysky se spustí z pendantu pokyn ke kalibraci os robotu. Data se následně uloží do řídicí jednotky. Často je tato kalibrace dostačující. Používá se v případech, kdy nastal výpadek zálohování kontroléru nebo aktuální polohy robotu, případně vybití záložní baterie robotu (umístěné v 2. ose). [70]



Obr. 56) Kalibrační značky [70]

Na osách robotu jsou od výroby značené místa (viz obr. 57 a) pro vložení „kalibračního nástroje“ (viz obr. 57 b). Ty jsou vzhledem k možnosti zanesení nečistot zakrytovány. Po vložení nástroje, RobotWare posouvá osy robotu tak, aby se nástroje navzájem dotýkaly (viz obr. 57 c). Hodnoty polohy os jsou zaznamenávány. [70]



Obr. 57) a) Otvory pro kalibrační nástroj na osách 4-6; b) kalibrační nástroj; c) kalibrace pomocí kalibračního nástroje pro osu 4

**Průběh kalibrace** – Vybere se, jakým způsobem je třeba robot kalibrovat, a jaké osy jsou třeba kalibrovat. Následně je robot přesunut do synchronizační polohy, ve které obsluha nasadí

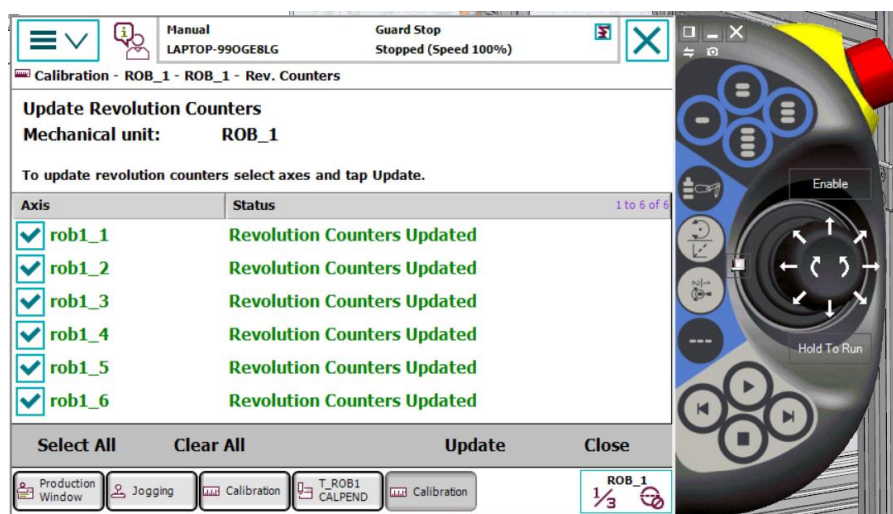


kalibrační nástroje. Proběhne kalibrace tak, že se robot bude natáčet. Po skončení kalibrace se opět vyjmou kalibrační nástroje a robot ověří, zda jsou všechny tyto nástroje vyjmuty. Posledním krokem je samotné uložení kalibračních dat. [70]

### Ukázka kalibrace počítadla otáček v SW RobotStudio

Pomocí SW RobotStudio lze robot kalibrovat prostřednictvím Pendantu, který je v rámci SW dostupný. Simuluje tak reálný Pendant, se kterým je možné pracovat s robotem.

Jako prvním krok je propojit robot a Pendant v SW. To se zajistí pomocí přepnutí do manuálního módu. Následně je potřeba seřadit osy robotu pomocí kalibračních rysek, jak již bylo zmíněno dříve. Seřízení stačí provést „od oka“. Po seřízení se na Pendantu nastaví druh kalibrace a vybere se manuální kalibrace, ve které je možnost aktualizovat počítadla otáček (viz obr. 58). Kalibrovány mohou být všechny osy, nebo je možnost kalibrovat pouze některé osy. Po dokončení akce je robot kalibrován. Při kalibraci může dojít z rozhození již definovaných bodů nebo workobjectů.



Obr. 58) Kalibrace počítadla otáček

### 8.1.2 Manuální kalibrace

Manuální kalibrace je uskutečněna pomocí obsluhy, která pomocí Pendantu manipuluje s robotem. Provádí se pomocí kalibračních kolíků na začátku umístěných do otvorů v robotu. Postup se oproti zmíněné kalibraci os robotu liší. Nejprve obsluha určí, která osa se bude kalibrovat a následně umístí kalibrační nástroj. Kalibruje se postupně od osy č. 1 až po osu č. 6 nikoliv všechny najednou. Následuje kontrola pomocí synchronizační polohy. Obsluha opakuje akci pro všechno osy, které jsou třeba kalibrovat. [70]

Pro kalibraci osy 5 a 6 slouží speciální příruba namontovaná na konci robotu a kalibrační kolík nasazený v místě pro kalibraci na ose 5. [70]

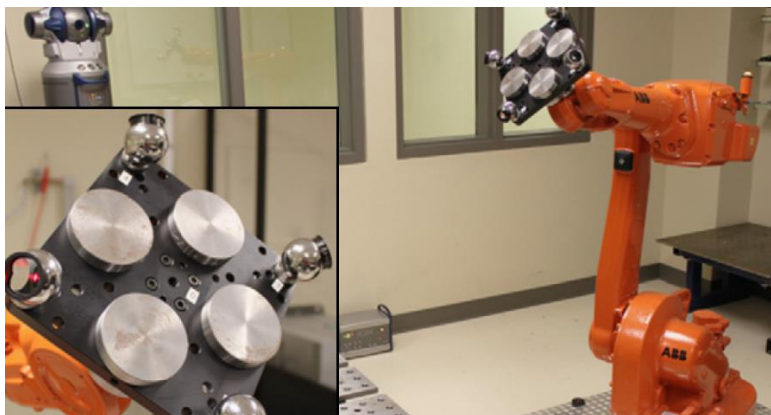
Přesný postup kalibrace jednotlivých os lze nalézt, jak v manuálu od ABB, tak přímo v Pendantu. Výrobce doporučuje používat stále stejnou metodu kalibrace. [70]

### 8.1.3 Absolutní kalibrace

Provádí se jako kalibrace TCP v softwarovém nástroji CalibWare v programu RobotStudio. Uživatel si navrhne potřebné robotické pracoviště a pomocí nástroje CalibWare si robot zkalibruje. [70]

### Kalibrace robotu pomocí Laser Trackeru

Robot lze kalibrovat prostřednictvím Laser Trackeru (viz obr. 59). Na přírubu se upevní požadovaný počet sond s koutovým odražečem, podle kterých se robot orientuje. Robot se pohybuje tak, aby při dokončení pohybu mohl systém snímat sondu na přírubě. [77]



Obr. 59) Kalibrace robotu pomocí Laser Trackeru [77]

## **8.2 Kalibrace konfokálního senzoru**

Konfokální senzor od firmy Keyence se před vydáním na trh kalibruje v rámci výroby. Po koupi je k senzoru přiložen kalibrační list. Ten je platný po dobu jednoho roku a jsou v něm uvedeny veškeré hodnoty. Po uplynutí dané doby se senzor musí překalibrovat, tj. uskutečnit opětovné měření. To lze vyřešit dvěma způsoby.

První způsob spočívá v zaslání firmě Keyence, ta jej svými metodami seřídí a opětovně kalibruje. K znovu kalibrovanému senzoru se opět přidá kalibrační list.

Druhá možnost umožňuje kalibraci provádět ve vlastní firmě. Kalibrace se provádí za pomoci etalonu. V tomto případě se pod pojmem etalon rozumí přesně změřený plátek s definovanými rozměry. Na tomto přípravku se ověří přesnost měření.

Kalibruje se celý řetězec. Ten je složen z měřicího senzoru, řídicí a optické jednotky. V případě poškození jedné nebo druhé komponenty dochází k vyřazení celého řetězce. Není možnost ponechat si jednu komponentu a vadnou vyměnit za novou. Po výměně celého řetězce se musí znovu kalibrace opakovat.

## **8.3 Kalibrace soustavy robot a senzor**

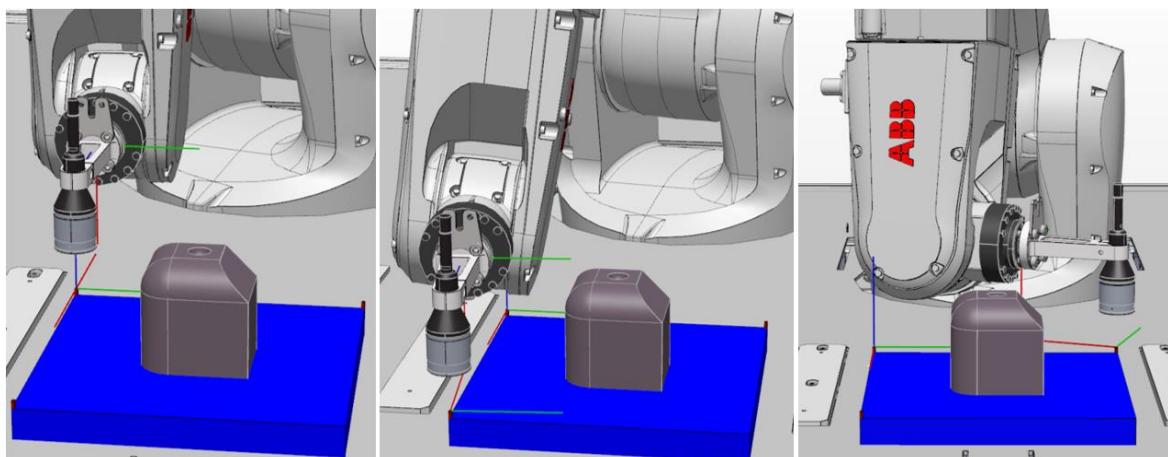
Kalibrace robotu společně se senzorem závisí na správně definovaném TCP bodě. V případě, kdy je již konfokální senzor nasazen na koncovém efektoru robotu, může začít přesné určení TCP bodu senzoru. Po úspěšném vyhodnocení TCP bodu lze zahájit postup kalibrace.

Samotný proces kalibrace spočívá v najíždění robotu se senzorem na vytvořené kalibrační značky, u kterých je známa jejich poloha (viz obr. 60). Značky se umístí přímo do pracovního prostoru robotu takovým způsobem, aby nezasahovaly do měření. Po vložení kalibračních značek je důležité ověřit bezproblémové najetí robotu na daná místa. Ten na každém měřicím bodě zastaví, aby senzor mohl zaznamenat hodnoty. Zastavení robotu závisí na ustálení polohy robotu a době měření senzoru. Robot se nechá projet vytvořenou dráhou pro kalibraci. Takto se robot se senzorem „zorientují“ v prostoru. Mezi proces kalibrace a proces

měření se vloží bod, který slouží jako „čekací pozice“. V tomto bodě robot na krátký čas zastaví a senzor zpracuje naměřené hodnoty (mezivýpočty).

Aby měla kalibrace účinek, tak se kalibrační značky zpravidla spojují s místem měření. Pokud dojde k posunutí či vychýlení měřeného objektu, musí dojít také k „re-kalibraci“. Tento kalibrační proces probíhá při každém nově spuštěném měření.

Pro tento případ měřicí aplikace jsou použity tři kalibrační značky rozmístěné na krajích desky, kde je položen testovací díl (viz kapitola 7 obr. 45). Čas kalibrace v rámci měřicí aplikace dosahuje hodnoty 4,5 s.



Obr. 60) Nájezdy robotu na kalibrační značky

Jelikož kalibrace úzce souvisí s pojmem přesnost a opakovatelnost bude v následující kapitole nastíněn rozbor a doplnění možností eliminace vzniklých chyb a nepřesností robotu.

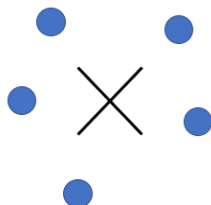


## 9 PŘESNOST VERSUS OPAKOVATELNOST

Náplní této kapitoly bude seznámení se s problematikou vlivu rychlosti a orientace ramen na přesnost a opakovatelnost robotu, jako významných charakteristik a vlastností. První část kapitoly se zaměří na definování potřebných pojmů přesnost a opakovatelnost a ve druhé části bude nastíněno, jakým způsobem lze robot nastavit tak, aby byly výsledky co nejpřesnější a při měření nedocházelo k výchylkám. Pro vysvětlení rozdílnosti pojmů, je třeba nejprve definovat každý pojem jednotlivě.

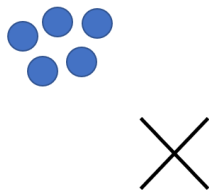
### 9.1 Přesnost a opakovatelnost

- **Přesnost** – lze ji definovat jako absolutní chyba měření, jakožto odchylka měření hodnoty od hodnoty správné (viz obr. 61). „*Přesnost je maximální odchylka skutečné pozice koncového bodu manipulátoru od pozice požadované*“. [78]



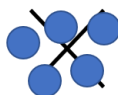
Obr. 61) Dobrá (vyhovující) přesnost [78]

- **Opakovatelnost** - „*Opakovatelnost určuje, s jakou přesností je návratnost do stejné polohy*“. Při stejně zadané poloze se koncový bod dostane do stejného místa s malou odchylkou (rozptyl dané plochy). Hodnota je závislá na mechanice robotou, a to jeho rozlišení kloubových enkodérů, tuhosti ramen nebo převodech. Opakovatelnost nelze snadno eliminovat (viz obr. 62). [78]



Obr. 62) Dobrá (vyhovující) opakovatelnost [78]

- Kombinací dobré (vyhovující) přesnosti a opakovatelnosti lze dosáhnout požadované polohy (viz obr. 63). [78]



Obr. 63) Dobrá (vyhovující) přesnost a opakovatelnost [78]

Pojmy přesnost a opakovatelnost se často spojují s kalibrací. Pomocí těchto dvou hodnot se udávají parametry robotu, které jsou důležité pro jeho správný chod. Jsou specifikovány podle chyb, které robot může dosáhnout a pomocí kalibrace se velikost chyb snižuje. [76]

Chyby robotu jsou zaznamenávány ze dvou pohledů, geometrické a negeometrické popřípadě kinematické a nekinematické. Pod kinematickou chybou lze představit nastavení vzájemných poloh os a jejich rozměru a pod pojmem nekinematické chyby se prezentuje tření v kloubech, vůle v motorech, celková tuhost, teplená roztažnost nebo vzájemná poloha kloubů a ramen. [76]

Výrobce robotu IRB 1200-5/0.9 ABB uvádí ve svém manuálu hodnotu opakovatelnosti a přesnosti. Výrobce však nemůže zajistit absolutní přesnost. Ta závisí na použité aplikaci, jejíž součástí je i volba nástroje nasazeného na robot. Samozřejmě záleží i na nastavení robotu, ale nedílnou součástí je i vhodné nastavení použitého nástroje a podmínkách v pracovišti. [76]

Snaha firmy ABB i veškerých výrobců robotů je neustále zlepšovat hodnoty přesnosti a opakovatelnosti, aby se co nejvíce přiblížili přesnosti absolutního polohování robotu. [76]

## 9.2 Metody eliminace chyby

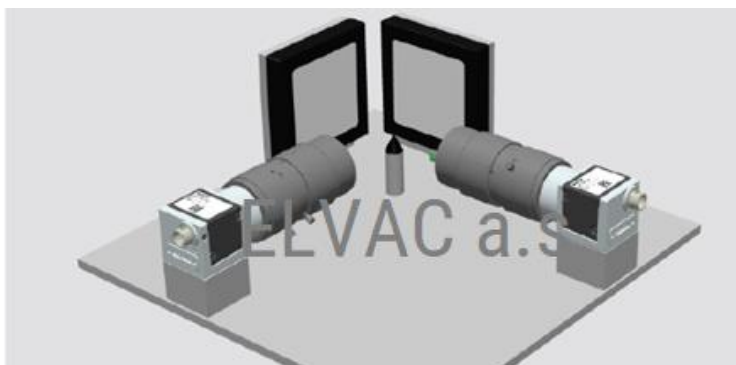
Chyby měření mohou být způsobeny mnoha aspekty. Mezi hlavní se řadí natočení os robotu, jeho rychlost, zrychlení, špatně definovaný bod i samotné zahřátí robotu (jedná se o zahřívací sekvenci, která se spouští před danou aplikací, aby se robot zahřál na nominální hodnotu). Dalším ovlivněním parametrů je teplota prostředí, kde při výkyvech teplot může docházet k teplotní roztažnosti. Aby se co nejvíce předešlo těmto chybám nechává se robot kontrolovat. Kontrola opakovatelnosti většinou probíhá ve spolupráci s kamerovým systémem, sondou, laserem nebo jiným sledovacím zařízením, které zajišťuje výsledky. K měření a zjištění parametrů robotu lze využít několika metod. [76]

- Metoda otevřené smyčky (open-loop methods) – k měření se využívá kamer nebo laseru, pomocí kterých lze měřit jakékoliv pozice robotu;
  - Měření plné konfigurace robotu (full pose) – měří se poloha a orientace robotu;
  - Měření částečné konfigurace (partial pose) – měří se pouze poloha koncového bodu robotu;
  - Rozšířená metoda částečné konfigurace (enhanced partial pose) – při využití doplňujících metody se dokáže změřit poloha robotu a i orientace;
  - Analýza bodů z kruhu (circle point analysis) – předem určené body se měří pomocí otáčení každé osy robotu samostatně. Proložením těchto bodů vznikne pomyslná kružnice, kterou robot opisuje a z ní se dají dopočítat parametry robotu.
- Metoda uzavřené smyčky (closed loop methods) – zadáním konkrétní podmínky se vybere množina bodů podmínku splňující. V každém bodě se zachytí pozice robotu a vyhodnocení vychází ze závislosti daných bodů. Do množiny bodů spadají:
  - 1D – linka, hrana;
  - 2D – mřížka s přesně definovanými parametry;
  - 3D – koule.

Další možností je využití pravítka a laserového senzoru vzdálenosti, který zaznamená polohu. Robot se posouvá v okolí pravítka o přesně danou hodnotu a pomocí kamery se kontroluje vzájemná poloha mezi koncovým bodem robotu a pravítkem. [76]

### 9.2.1 Měření opakovatelnosti

Principiálně je měření opakovatelnosti založeno na najíždění robotu opakovaně na ručně naučený bod (pomocí pendantu) se stále stejnou konfigurací. Pro nastavení bodu se používá buď statického hrotu sledovaného kamerami, nebo přímo úchylkoměru, který hodnotu zaznamená. K naučení pozice bodu dojde tehdy, kdy se robot v tomto bodu nachází. V naučeném bodě se robotu musí ustálit a provede se např. kamerová kontrola. Tato kontrola se provádí za pomoci dvou kamer s back light světly (viz obr. 64), tak se zajistí správná detekce hran dvou hrotů proti sobě. Takto se na bod najíždí s určitým počtem opakování (například 30x), aby se zajistil dostatečný počet výsledků pro vyhodnocení.



Obr. 64) Příklad kontroly pomocí dvojice kamer

Druhou možností je měření pomocí již zmíněného úchylkoměru (přesněji digitálního úchylkoměru Mitutoyo (viz obr. 65). Robot bude najíždět hrotem na dotykovou sondu (úchylkoměr).



Obr. 65) Úchylkoměr [79]

Následně se z naměřených hodnot vypočte střední hodnota a porovná se s výsledky, které uvádí výrobce.

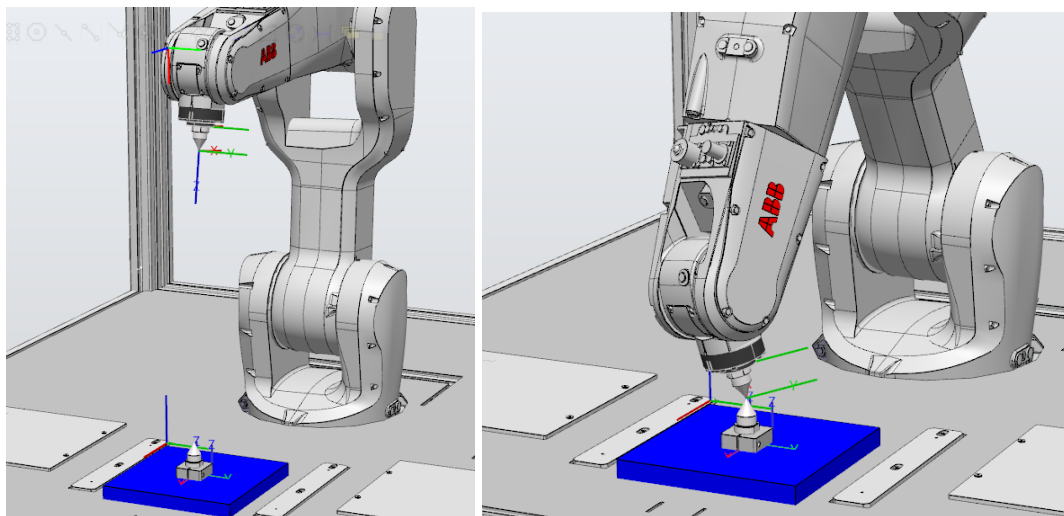
Přesnost výsledků závisí hlavně na konstrukci a výrobě hrotů. Hrot musí mít přesně definovaný TCP bod. Proto je vhodné volit krátké prodloužení v ose z, aby se zvýšila přesnost výroby.

#### Simulace

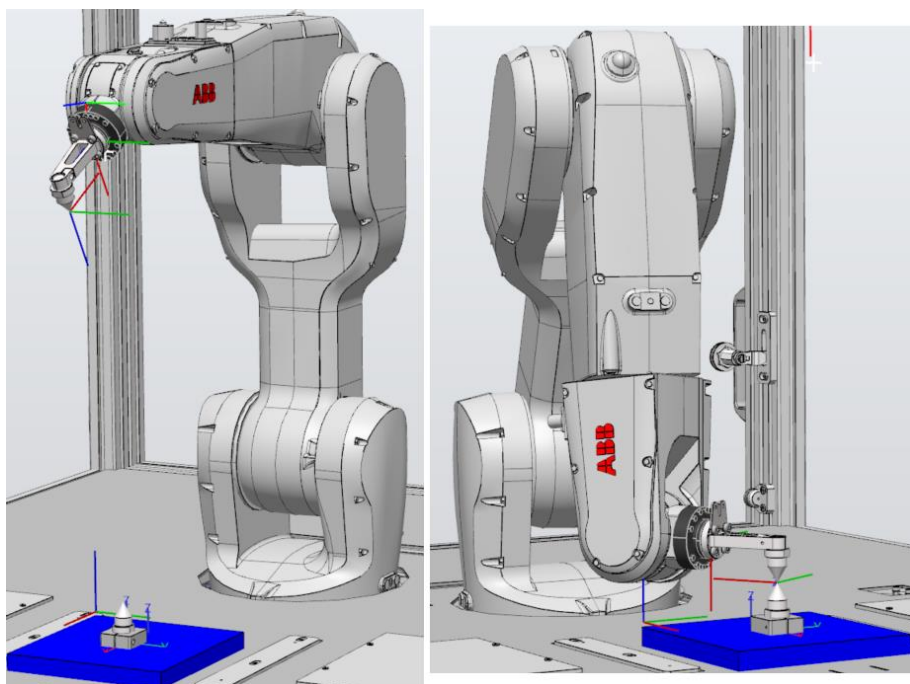
V práci budou naznačeny dvě metody měření opakovatelnosti pomocí pracovního prostoru s robotem. Jako první varianta se nabízí vložení hrotu na přírubu robotu (viz obr. 66). Hrot je navržen tak, aby nahradil koncový efektor a mohl být přímo upnut na konec robotu. Takto se ověří opakovatelnost robotu bez koncového efektoru.



Druhou variantou je použití koncového efektoru, uvedeného v práci, pro konfokální senzor (viz obr. 67). Takto se konfigurace os přiblíží konfiguraci při měřicí aplikaci a může se ověřit opakovatelnost sestavy.



Obr. 66) Příklad měření opakovatelnosti: varianta 1



Obr. 67) Příklad měření opakovatelnosti: varianta 2

Na pracovní desku se umístí držák, v němž je umístěn totožný hrot jako na robotu. Určí se dráha s danou konfigurací os tzn. robot se naučí bod. Po naučení bodu se pohyb po naučené dráze opakuje např. třicetkrát. V simulaci je dráha k naučenému bodu doplněna o bod, ve kterém robot sníží rychlost při nájezdu. Po dojetí na naučený bod se robot v tomto bodě zastaví a ustálí se tak jeho poloha. V reálném případě by v tento moment nastalo zaznamenání bodu pomocí kamer nebo úchylkoměru.



Bohužel v simulaci nelze měřit opakovatelnost, neboť se pracoviště v simulaci chová jako v ideálním prostředí. Avšak díky této simulaci lze ukázat, jak by tato kontrola opakovatelnosti probíhala na reálném pracovišti i s konkrétními přípravky.

### 9.2.2 Měření přesnosti

Měření přesnosti probíhá pomocí Laser Trackeru a předem naučených bodů robotu pomocí offline metody. Robot se naučí bodům v prostoru a Laser Tracker polohu robotu v těchto bodech detekuje.

### 9.2.3 Možné vznikly chyb a jejich náprava

- **Konfigurace os robotu** – natočení os a jejich konfigurace může významně ovlivnit přesnost a opakovatelnost robotu. TCP bod robotu se od bodu měření může odchýlit v závislosti na natočení os a nemožnosti v tomto rozložení najet s vyšší přesností (např. u maximálním natočení os). Každé natočení os může k vybranému bodu najet s jinou odchylkou. Tento problém lze ošetřit vyzkoušením nájezdů s rozdílnými konfiguracemi a vybrat poté tu nejvhodnější.
- **Trajektorie robotu** – Přesnost robotu ovlivňuje i samotná tvorba trajektorie robotu. V případě nevhodně zvolené trajektorie se ovlivní nájezd do potřebného bodu, ale také konfigurace os, která chybu může zvětšit. Trajektorie musí být vedena tak, aby měl robot při nájezdu co nejvíce ustálenou konfiguraci a nebyl nucen se k bodu dostávat v krajních hodnotách natočení os. Nejvhodnější je vytvořit nájezdy a výjezdy, pokud možno kolmo na objekt, na kterém je přichystaný potřebný bod a definovat přesný druh pohybu. Volba trajektorie ovlivňuje i čas, za který robot projede veškeré dráhy.
  - Pokud je známá přesná geometrie robotu i s odchylkami, je možné dopočítat se chyby, se kterou robotu dojde na požadovaný bod. Tuto odchylku je možno následně odečíst a zajistit tak nájezd s menší chybou. [76]
- **Rychlost robotu** – robot IRB 1200-5/0,9 dokáže vyvinout rychlost maximálně 8,9 m/s<sup>2</sup>. Rychlost je však závislá i na hmotnosti a velikosti nástroje, podle kterého je třeba se také orientovat. Použitá rychlost ovlivňuje nájezd na potřebný bod svou velikostí hodnoty. Čím je rychlost nájezdu vyšší tím méně přesný tento nájezd bude. Je to jedním z důvodů snížení rychlosti v měřicí aplikaci při nájezdu do měřeného bodu. Snížením rychlosti a tím i času dojezdu má robot více prostoru pro natočení a ustálení ve správné konfiguraci. Při najetí vhodnou rychlostí nájezdu na daný bod, je vhodné rychlost ponechat i pro další nájezdové body.
- **Akcelerace (zrychlení) robotu** – s rychlostí robotu souvisí také jeho zrychlení z nulové hodnoty na požadovanou. Stejně jako u rychlosti se při pomalejším rozjezdu robotu zvýší přesnost nájezdu na bod. Hodnota akcelerace se snižuje jednak pro šetření motoru robotu, tak i kvůli zvýšení přesnosti nájezdu.

Pomocí funkce „WaitRob\InPos“ lze robot ustálit v dané poloze a zvýšit tak celkovou přesnost při měření. V měřicí aplikaci se tento povel vložil před povel „WaitTime“ pro ustálení polohy robotu v daném bodě. Tyto dva povely simulují měření senzoru.

Při tvorbě aplikace je vhodné dodržovat stejné parametry a pohyby v celém měření. Tak se zajistí sjednocení potenciálně vzniklé chyby.



## 10 ZHODNOCENÍ VARIANT MĚŘENÍ

Úkolem diplomové práce bylo navrhnout a zhotovit aplikaci na měření rozměrů pomocí konfokálního senzoru a 6-tiosého robotického ramene v software RobotStudio, pro účely firmy Elvac a.s.

### 10.1 Porovnání variant měření

Vše se odvíjelo od myšlenky nahradit dotykové měření bezdotykovým, a to konkrétně optickým. Na začátku práce bylo provedeno zhodnocení výhod a nevýhod těchto dvou metod obecně, aby se dalo z této skutečnosti následně vycházet.

Pomocí zadání a požadavků byly vytvořeny a popsány tři varianty bezdotykového optického měření, z nichž je vybrána jedna varianta. Všechny varianty byly tvořeny se stejnými parametry nástroje a stejným definováním rychlostí, drah a dalších náležitostí, pouze se volily jiné body měření, aby bylo vyzkoušeno více možností a bylo možné jednotlivé varianty porovnat z hlediska času i vyhovujících bodů.

Každé měření obsahuje čtrnáct měřících bodů rozmístěných po testovaném dílu. Před měřením probíhá kalibrace u všech variant stejně a jsou ji také přiděleny navíc tři měřící body. Kalibrace zůstává ve všech variantách stejná s časem měření 4,5 s. Měřené body byly rozmísťovány tak, aby přeměřily polohu dílu a provedly kontrolu rozměrů.

Nakonec byla vybrána první metoda. Volba metody závisela na rozmanitosti bodů, které jsou rozmístěny i na hranách měřeného dílu. Vzhledem k vlastnostem konfokálního senzoru, které uvádí výrobce Keyence, je možné měřit s vysokou přesností právě hrany, rohy objektů, zaoblení a další. Z tohoto důvodu se volba přiklonila k prvnímu řešení. Dalším aspektem, který rozhodl o volbě této varianty, je čas. Ze všech tří metod se ukázala první metoda jako nejrychlejší, sice se nejedná o velké rozdíly, ale kratší čas je určitě výhodnou. Zde hrají roli vhodně poskládané body pro měření, jejich natočení a rozložení.

### 10.2 Zhodnocení dotykové metody vůči optické metodě

Po vybrání varianty optického měření byly body této simulace využity pro simulaci metody dotykové. V programu RobotStudio bylo zhotoveno dotykové měření pro konkrétnější porovnání těchto dvou metod. Pro měření byl použit dotykový senzor GT2-P12 a vložen na robot pomocí stejného efektoru použitého pro optické měření. Simulace měření měla především demonstrovat rychlostní tzn. časové rozdíly mezi metodami. Nicméně výrobce konfokálního senzoru (optická metoda) uvádí vyšší přesnost než u dotykového senzoru. A pokud dojde k vhodnému nastavení je možné dosáhnout ještě vyšší přesnosti měření.

Posloupnost nájezdových bodů zůstala stejná, změnily se ale konfigurace nájezdu u některých bodů a některé orientace bodů v důsledku rozdílných rozměrů senzoru (dotykový senzor je delší o menším průměru). Velký důraz je kladen na přesný nájezd senzoru na hrany. Dráha k bodu musí být kolmá na daný bod hrany. Pokud by nájezd nebyl dokonale kolmý, mohlo by dojít k nechtěnému odchýlení senzoru, znehodnocení výsledku nebo dokonce k poškození senzoru. Samozřejmě bylo třeba pozměnit rychlosti pohybu robotu za nižší, a i dobu měření v měřeném bodě, která je u dotykového měření delší kvůli kontaktu s objektem. Např. definovaná rychlost nájezdu klesla z v100 na v80 a čas měření se zvýšil na dobu 0.6 s. Po všech potřebných úpravách se podařilo díl změřit i s časem kalibrace (6 s) za 25,9 s.

Pro hodnoty z tabulky vyplývá, že konfokální (optická) metoda měření může být až o třetinu rychlejší než metoda dotyková, při správném nastavení všech komponent a parametrů.

Tab 12) Porovnání hodnot AccSet dotykové a optické metody

Hodnota AccSet	metoda optická	metoda dotyková
100, 100	16,9	25,1
30, 30	21,9	30,4
90, 30	18,1	26,3
90, 40	17,7	25,9
100, 20	18,4	26,6
100, 30	17,8	26,0

Po vyhodnocení metody měření, která bude použita, a veškerých přípravách ve formě kalibrace a kontroly opakovatelnosti uvedených v dřívějších kapitolách, lze vytvořený program nahrát do reálného kontroléru robotu a vyzkoušet simulaci v pracovišti.

### 10.2.1 Propojení SW RobotStudio s kontrolérem robotu

Pokud je simulace dokončena je možné přímo v programu nastavit propojení s kontrolérem reálného robotu. Řídící jednotka se propojí s počítačem pomocí ethernetového kabelu. V software RobotStudio je třeba spustit povel „Go Offline“ v záložce „Controller“, tímto se do kontroléru nahrají data. Pomocí povelu „Create Relation“ se mohou přenášet data jak z PC do kontroléru, tak i z kontroléru do PC. Prostřednictvím „FlexPendantu“ se povolí oprávnění a software RobotStudio se začne chovat jako ovládací panel, který ovládá obsluha. Po přidání kontroléru do software, lze nahlížet do dat kontroléru a upravovat je podle potřeby.

### 10.2.2 Proces měření

Před měřením jsou nahrány přesné rozměry objektu do software pro konfokální senzor (CL-NavigatorN), nebo je možnost výroby „ideálního“ kusu, podle kterého se bude další měření orientovat. V software se vybere typ měření a zvolí se příslušný senzor. Po propojení se software je možné zahájit měření. Měření probíhá podle nadefinovaných drah v simulaci, kde konfokální senzor připojený přes PLC k počítači zaznamenává hodnoty a posílá je ke zpracování. Tyto hodnoty jsou v podobě odchylek od zadané referenční hodnoty (např. 0). Software konfokálního senzoru je podle vybraného zadání vyhodnotí. Senzor může ověřit správnou polohu objektu a ověřit jeho rozměry.

Pro tento účel je testovací díl přeměřován a zjišťuje se, jak přesné je měření stěn, zkosení hran a různého zaoblení pomocí konfokálního senzoru, aby se z této skutečnosti dalo vycházet pro další praxi.

## 10.3 Doporučení pro praxi

Z výše uvedeného vyplývá, že při měření objektů je důležité zvolení bodů s vhodnou orientací, vzájemnou vzdáleností, nastavením drah, rychlostí, akcelerace a dalších již zmíněných parametrů. Nyní je možné uvažovat o volbě daného měření, a to dotykového nebo bezdotykového měření. Zatím ještě není možné zvolit bezdotykovou optickou metodu pro všechny druhy měření, ale v případě konfokální metody se technika dostává velmi daleko při

vhodně zvolené metodě měření. Na druhou stranu klasická metoda dotykového měření je zatím nenahraditelnou součástí ve všech technických odvětvích.

Výsledkem porovnávání metod bylo ověření časového rozdílu zmíněného v počátečním porovnání, ze kterého vyplývá až třetinové snížení času u bezdotykové metody.

Vzhledem k velkému rozdílu cen mezi těmito typy senzorů je důležité zvážit všechny možnosti senzorů. Avšak velkým plusem je rychlost, „neinvazivní“ způsob měření a vyšší přesnost u konfokálního senzoru, tudíž se tato technologie stává žádoucí při kontrole křehkých, průhledných nebo málo rozměrných objektů či těžce dostupných míst, také díky kratší době měření je možné ji využívat, jako „rychlou“ kontrolu součástí při výrobě.

Na základě skutečnosti, že firma již zprostředkovává kontrolu rozměrů s dotykovým senzorem a tuto problematiku měření ovládá, je žádoucí konfokální metodu pomocí testování prověřit. Pokud dojde k potvrzení zde uvedeného, je na místě uvažovat o zakomponování do reálných zakázek.

Práce měla být v některých místech doplněna o praktické náhledy na měření, bohužel v této době nebylo možné tohoto dosáhnout. Vše se vyvíjí se zpožděním a byla potřeba se věnovat současným problémům a zakázkám, které je možné realizovat. Proto se uskutečnění pracoviště odkládá na dobu neurčitou a firma se v současnosti bude věnovat vývoji dalších projektů, které jsou v tuto dobu podstatnější.



## 11 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zhotovit návrh pro měření rozměrů optickým senzorem a robotickým ramenem. Jedná o aplikaci řešenou v rámci robotického pracoviště uzpůsobené pro testování různých aplikací ve vývoji, které toto měření umožňuje.

V úvodní části se práce zaměřila obecně na rešerši možných optických metod, které neodmyslitelně patří k tématu společně s ukázkou konkrétních optických systémů, jako jsou kamerové systémy, senzory atd. a jejich popis. Dále byly sepsány možnosti kalibrace již rozebraných systémů, a to kalibrace kamer a kalibrace optických senzorů s příklady. Následně se práce omezila pouze na optické senzory s konkrétním zaměřením na konfokální senzor.

Před zahájením samotné tvorby návrhu bylo provedeno celkové seznámení se se zadáním daného problému a nastíněn postup řešení. Bylo také uvedeno a rozebráno několik potřebných součástí spadajících do pracovního prostoru. Postupně se práce dostala ke specifikaci potřebných parametrů a ke správnému pochopení všech souvislostí.

Než práce přešla k praktické části zaměřila se na popis programu RobotStudio, ve kterém se měření vytvářelo. Po splnění těchto bodů bylo možné zahájit tvorbu návrhu měřicí aplikace. Měřicí aplikace byla vytvořena pomocí programu RobotStudio od firmy ABB. Zde byl uveden postup se všemi náležitostmi potřebnými ke správnému vytvoření návrhu. Prvním krokem bylo zkompletování pracovního prostoru robotu, následovalo definování nástroje a definování jeho TCP bodu. Po vytvoření všech komponent bylo třeba vytvořit body, ty nadefinovat a nastavit parametry robotu podle potřeby. Pro možnost porovnání byly vytvořeny tři varianty měření, aby bylo zřejmé, jak se robot se senzorem chová při jinak volených bodech měření.

K práci neodmyslitelně patří kontrola robotu. V této kapitola byla kontrola popsána v podobě kalibrace robotu společně s kalibrací senzoru a celkové sestavy. Kalibrace sestavy je klíčová pro správný chod celého měření. Součástí kalibrace jsou i pojmy přesnost a opakovatelnost robotu. Problematika těchto pojmů byla následně také řešena pro úplnost práce. Pomocí programu RobotStudio se podařilo naznačit, jakým způsobem by probíhalo měření opakovatelnosti, a jakým způsobem se to ve firmě může řešit. Následoval rozbor možných chyb a možnosti, jak je možné jim v rámci příprav předejít.

Na závěr bylo provedeno zhodnocení, ve kterém se práce zaměřila na vyhodnocení variant návrhu měření. Všechny tři varianty byly z hlediska rozvržených bodů popsány a zhodnoceny z pohledu konečného času, efektivity zvolených drah robotu a různorodosti měření. K porovnání byly přidány i časy pro různé typy akcelerace. Vybraná varianta byla využita pro metodu dotykovou a pomocí stejného postupu vyhodnocení byly metody porovnány. Z porovnání vyplynulo, že i v rámci vyšší ceny konfokálního senzoru oproti dotykovému má význam metodu převést do praxe.





## 12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Profil společnosti. *Elvac* [online]. Ostrava [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.elvac.eu/domu/o-nas/profil-spolecnosti>
- [2] *Velmi přesný kontaktní digitální senzor: Řada GT2* [online]. In: . Mechelen: Keyence [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/contact-distance-lvdt/gt2/models/gt2-p12/>
- [3] Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, s.r.o. [cit. 2021-02-17]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dotykov-nebo-bezdotykov-mereni-struktury-povrchu.html>
- [4] Optické měřicí systémy. *JD DVOŘÁK, S.R.O.* [online]. Praha: JD Dvořák, s.r.o., 2018 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/opticke-merici-systemy>
- [5] *Keyence* [online]. Keyence corporation, 2021 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/>
- [6] *Micro-epsilon* [online]. micro-epsilon, 2021 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/>
- [7] JÄHNE, Bernd, Horst HAUBECKER a Peter GEIBLER. *Handbook of Computer Vision and Applications: Volume 1: Sensors and Imaging*. San Diego: Academic Press, 1999. ISBN ISBN 0-12-379771-3.
- [8] KALOVÁ, Ing., a Ing., HORÁK. Optické metody měření 3D objektů. *Elektrorevue* [online]. Brno: International Society for Science and Engineering, o.s., 2013 [cit. 2021-02-10]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [9] VOJÁČEK, Antonín. Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření. *Automatizace.HW.cz* [online]. 2015 [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [10] Snímače pro měření vzdálenosti. *AXIMA Solition* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.axima-obchod.cz/opticke-snimace-a-kamerove-systemy/snimace-pro-mereni-vzdalenosti>
- [11] JANÁKOVÁ, Ilona. Optické 3D měření. In: *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: [http://vision.uamt.feec.vutbr.cz/POV/lectures/12\\_Opticke\\_3D\\_mereni.pdf](http://vision.uamt.feec.vutbr.cz/POV/lectures/12_Opticke_3D_mereni.pdf)
- [12] Stereoskopické snímky. In: *Elektrorevue* [online]. Brno: International Science and Engineering Society, o.s., 2013 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>

- [13] VOJÁČEK, Antonín. Konfokální princip optického měření vzdáleností. *Automatizace.HW.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/konfokalni-princip-optickeho-mereni.html>
- [14] OMRON CORPORATION, . Nový konfokální senzor posunutí poskytuje velmi vysokou přesnost měření. *Elektroprumysl.cz* [online]. ElektroPrůmysl.cz, 2020 [cit. 2021-02-12]. ISSN 2571-0761. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/novy-konfokalni-senzor-posunuti-poskytuje-velmi-vysokou-presnost-mereni?fbclid=IwAR1hezAwUMVeW-7JbC0i7eXfvEL1bNcq4PeCjmf3qQlc382LfYhO9QIOSQ>
- [15] Konfokální snímače vzdálenosti, polohy a tloušťky pro transparentní materiály. *Micro-Epsilon* [online]. 2021 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/confocal-sensor/?fbclid=IwAR04rDuk6-S6L-hA50IB-tf-W6H6lviv9PT8cgiuRX6bGNIQe54GYGWD4oQ>
- [16] PLÁŠEK, Jaromír. Konfokální mikroskop: Renezance experimentálních metod. *VESMÍR: věda, příroda, člověk, společnost – časopis s tradicí od roku 1871* [online]. Praha: Vesmír, s. r. o., 1995, **741995** [cit. 2021-03-16]. ISSN 1214-4029. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1995/cislo-9/konfokalni-mikroskop.html>
- [17] Principy konfokální mikroskopie. *Katedra botaniky* [online]. Olomouc: Katedra botaniky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého, 2021 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <http://www.botanika.upol.cz/atlasy/confmicro/principles.php>
- [18] Jak funguje interferometrický systém?. *Renishaw: apply innovation* [online]. 2021 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/jak-funguje-interferometricky-system--38612>
- [19] ŠIŇOR, Milan. Interference světla. *ČVUT Praha - Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská: Katedra fyzikální elektroniky* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/node7.html>
- [20] NOVÁKOVÁ, Petra. *Digitální holografie a její aplikace v prostředí Matlab* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: [https://theses.cz/id/cgrr10/Diplomov\\_prce\\_final1.pdf](https://theses.cz/id/cgrr10/Diplomov_prce_final1.pdf). Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce Mgr. Dušan Mandát.
- [21] BLECHA, Martin. *Pracoviště pro optickou interferometrii* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30296425.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ilona Kalová, Ph.D.
- [22] SLO: Laboratoř interferometrie: Interferometrie v bílém světle. *Portál moderní fyziky* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/vyzkumne-skupiny/slo-laborator-interferometrie>

- [23] CCD vs. CMOS - srovnání senzorů. In: *W-technika: Termovizní a průmyslové přístroje* [online]. Praha: W-Technika group s.r.o. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.w-technika.cz/ccd-vs-cmos-srovnani-senzoru/>
- [24] MACENAUER, Andrej. Jak funguje CCD čidlo. *FotoAparát.cz: rádce fotografa* [online]. Praha [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.fotoaparat.cz/clanek/233/jak-funguje-ccd-cidlo-5021/>
- [25] Obrazové snímáče CCD vs. CMOS. *Netcam.cz* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://netcam.cz/encyklopedie-ip-zabezpeceni/obrazove-snimace-ccd-cmos.php>
- [26] KOLÍBAL, Zdeněk, Petr BLECHA, Radek KNOFLÍČEK et al. *ROBOTY A ROBOTIZOVANÉ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE*. První vydání. Brno: Vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [27] Snímáče CMOS. *Web Server Noel* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <http://noel.feld.cvut.cz/vyu/a2b31hpm/index.php/U%C5%BEivatel:Aubreja3>
- [28] Plošná (area-scan). *ATEsystem: focused on detail* [online]. Ostrava: ATEsystem s.r.o. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://eshop.atesystem.cz/c/2189/plosna-area-scan>
- [29] Řádkové kamery - Typy a technologie. *ATEsystem: focused on detail* [online]. Ostrava: ATEsystem s.r.o. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <http://kamery.atesystem.cz/know-how/line-scan-velky-pruvodce-radkovymi-kamerami/dil-1-radkove-kamery-typy-a-technologie/>
- [30] BeA4000-62km. In: *ATEsystem* [online]. Ostrava: ATEsystem s.r.o. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://eshop.atesystem.cz/d/837107/bea4000-62km>
- [31] PROKOP, Ing. Co je laserový tracker a jak se s ním měří?. *Automa: Časopis pro automatizační techniku* [online]. Ústí nad Labem, 2016, , 2 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/co-je-laserovy-tracker-a-jak-se-s-nim-meri-2009\\_08\\_39584\\_5371/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/co-je-laserovy-tracker-a-jak-se-s-nim-meri-2009_08_39584_5371/)
- [32] Laser Tracker FARO Vantage & Vantage E. In: *Industry plaza: All you need to run your factory!* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.industry-plaza.com/laser-tracker-faro-vantage-vantage-e-p178446.html>
- [33] Kdy je dobré použít při vytyčování teodolit a kdy totální stanici. In: *Progeostav* [online]. Pardubice: geoobchod, s.r.o., 2021 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.progeostav.cz/kdy-je-dobre-pouzit-pri-vytycovani-teodolit-a-kdy-totalni-stanici.html>
- [34] DT-2L. In: *3GON Positioning* [online]. 3gon Positioning s.r.o., 2019 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://cz.3gon.eu/teodolity/dt-2l>
- [35] Všechno, co potřebujete vědět o profilprojektorech: Zásadní technologie, skrytá za profilprojektorem, je elegantně jednoduchá. *Hexagon* [online]. 2021

- [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/solutions/technical-resources/metrology-101/all-about-optical-comparators>
- [36] Digitální profilprojektory řady JVB250E/JVB300E/JVB400E. In: *Jirka a spol.* [online]. Hronov: JIRKA a spol., s.r.o [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.meridla-jirka.cz/product/digitalni-profilprojektory-rady-jvb250e-jvb300e-jvb400e>
- [37] Vertikální profilprojektor V300-ECO /V400-ECO. In: *Jirka a spol.* [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.meridla-jirka.cz/product/vertikalni-profilprojektor-v300-eco-v400-eco>
- [38] Laserový skenovací mikroskop LEXT™ OLS5100 3D: Laserový mikroskop pro analýzu materiálu. *Olympus* [online]. Olympus corporation [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/microscopes/laser-confocal/ols5100/>
- [39] Princip konfokálních snímačů. *Micro-Epsilon* [online]. Micro-Epsilon, 2021 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/service/glossar/Konfokal-chromatisch.html>
- [40] *Bezkontaktní měření tloušťky: 100% kontrola prováděná na výrobní lince* [online]. In: . Mechelen: Keyence, 2020 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: [https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/laser-1d/cl-3000/models/cl-p007/?search\\_dl=1](https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/laser-1d/cl-3000/models/cl-p007/?search_dl=1)
- [41] Selection of Confocal Displacement Sensors. *Sensorland.com* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.sensorland.com/HowPage161.html>
- [42] Konfokální sondy. *Micro-Epsilon* [online]. Micro-Epsilon, 2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/confocal-sensor/confocal-chromatic-sensors/>
- [43] *More Precision: confocalDT // Confocal chromatic sensor system* [online]. In: . Ortenburg: Micro-Epsilon, 2021, s. 8 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat-confocal/dax--confocalDT-IFS2406--en.html#page=2&zoom=Fit>
- [44] IFS2406-2,5/VAC(003). In: *Micro-Epsilon* [online]. Micro-Epsilon, 2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat-confocal/dax--confocalDT-IFS2406--en.html#page=2&zoom=Fit>
- [45] Kompaktní konfokální snímače pro přesné měření posunutí a tloušťky – confocalDT IFS2406. In: *Micro-Epsilon* [online]. Micro-Epsilon, 2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/confocal-sensor/confocal-chromatic-sensors/>
- [46] *Confocal Fiber Displacement Sensor: ZW-8000/7000/5000 Series* [online]. In: . Omron, 2021, s. 27 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://industrial.omron.cz/cs/products/zw-series>

- [47] ZW Series: Bezdotykový, konfokální senzor posunutí s bílou diodou LED. *Omron: Průmyslová automatizace* [online]. OMRON Corporation, 2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://industrial.omron.cz/cs/products/zw-series>
- [48] ZW Series: Bezdotykový, konfokální senzor posunutí s bílou diodou LED. In: *Omron* [online]. OMRON Corporation, 2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://industrial.omron.cz/cs/products/zw-series>
- [49] ZW-S8030 2M. In: *Omron* [online]. OMRON Corporation, 2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://industrial.omron.cz/cs/products/zw-series>
- [50] *Měření libovolného materiálu nebo povrchu s vysokou přesností: Konfokální měřicí systém, Řada CL-3000* [online]. In: . Mechelen: Keyence, 2019 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: [https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/laser-1d/cl-3000/models/cl-p007/?search\\_dl=1](https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/laser-1d/cl-3000/models/cl-p007/?search_dl=1)
- [51] *CL Průvodce nastavením: Průvodce nastavením jednotek řady CL-3000* [online]. In: . Osaka: Keyence, 2019, s. 28 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/laser-1d/cl-3000/models/cl-3000/downloads/?mode=ma>
- [52] Hlavice 30 mm: (CL-P030/CL-L030). In: *Keyence* [online]. Mechelen: Keyence, 2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/laser-1d/cl-3000/models/cl-3000/downloads/?mode=ma>
- [53] Konfokální měřicí systém: Řada CL-3000. In: *Keyence* [online]. Mechelen: Keyence, 2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: [https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/laser-1d/cl-3000/models/cl-p007/?search\\_dl=1](https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/laser-1d/cl-3000/models/cl-p007/?search_dl=1)
- [54] Laserový senzor vzdálenosti HG-C. In: *Conrad Eletronic* [online]. Conrad Electronic, 2020 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/panasonic-hg-c1400-p-laserovy-senzor-pro-mereni-vzdalenosti-1-ks-24-vdc-max-dosah-400-mm-d-x-s-x-v-44-x-20-x-25-mm-1416060>
- [55] Laserový systém XL-80. *Renishaw: apply innovation* [online]. 2021 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/laserovy-system-xl-80--8268>
- [56] SKOPAL, RNDr. a CSc., FIALA. Kalibrace a přesnost měření. *MMSpektrum* [online]. [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kalibrace-a-presnost-mereni.html>
- [57] *TNI 01 0115:2009 Mezinárodní metrologický slovník: Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. Český překlad. 2007.
- [58] G D'EMILIA, a D DI GASBARRO. Review of techniques for 2D camera calibration suitable for industrial vision systems. *Journal of Physics: Conference*

- Series* [online]. IOP Publishing, , 7 [cit. 2021-05-14]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/841/1/012030>
- [59] KOTEK, Ing. Kalibrační proces ve 3D. *DOCPLAYER* [online]. 2021 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10525211-Kalibracni-proces-ve-3d.html>
- [60] Funkce kalibrace snímačů strojového vidění: Reálné měřicí jednotky a souřadnice robota jediným kliknutím. In: *AXIMA Solition* [online]. [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.axima-obchod.cz/admin-data/storage/get/116-funkce-kalibrace-snimacu-visor.pdf>
- [61] Calibration of line scan cameras. *Vision Doctor: Solution for Industrial Machine Vision* [online]. 2020 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: [https://www.vision-doctor.com/zeilenkameras/kalibration-zeilenkamera.html?fbclid=IwAR2vMABbR7YKPyJ5-f8CAH0SwlFalIM5OZ4Kgv\\_g55\\_y0\\_v8\\_h4yrzypU9Q](https://www.vision-doctor.com/zeilenkameras/kalibration-zeilenkamera.html?fbclid=IwAR2vMABbR7YKPyJ5-f8CAH0SwlFalIM5OZ4Kgv_g55_y0_v8_h4yrzypU9Q)
- [62] Slovník: Kalibrace, Kalibrační protokol. In: *Micro-Epsilon* [online]. Micro-Epsilon, 2021 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/service/glossar/Kalibrieren.html>
- [63] PLIEŠTIK, Marek. *Re:Keyence: Dotaz ohledně senzoriky* [e-mail]. 22. 2. 2021. [cit. 2021-03-25].
- [64] *METODIKA PROVOZNÍHO MĚŘENÍ DÉLKOMĚRY* [online]. In: . Praha: Česká metrologická společnost, z.s, s. 18 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: [http://www.spolky-csvts.cz/cms/sites/default/files/mpm\\_1120217\\_metodika\\_provozniho\\_mereni\\_d\\_elkomery\\_0.pdf](http://www.spolky-csvts.cz/cms/sites/default/files/mpm_1120217_metodika_provozniho_mereni_d_elkomery_0.pdf)
- [65] ŠRÁMEK, J. *Re: Dotaz ohledně senzoriky* [e-mail]. 12. 2. 2021. [cit. 2021-03-25].
- [66] *TechNote: Calibrate laser sensoren optoNCDT 2300*. Ortenburg.
- [67] SKALICKÝ, Jiří, Jiří VACEK a Jarmila IRCINGOVÁ. *Systémový přístup k projektovému managementu* [online]. První. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018 [cit. 2021-02-12]. ISBN 978-80-261-0836-8. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/30871/1/Syst%C3%A9mov%C3%BD%20p%C5%99%C3%ADstup%20k%20projektov%C3%A9mu%20managementu.pdf>
- [68] LACKO, Branislav. Systémový přístup. In: *Doc. Ing. Branislav LACKO, CSc.* [online]. 2020, s. 7 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: [https://lacko.otw.cz/eseje/Systemovy\\_pristup.doc.pdf](https://lacko.otw.cz/eseje/Systemovy_pristup.doc.pdf)
- [69] JANÍK, Přemysl a Jiří MAREK. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí*. První. Praha: Grada Publishing, a.s., 2013. ISBN 978-80-247-4127-7.

- [70] *Product manual: IRB 1200* [online]. In: . VÄSTERÅS: ABB AB, 2018, s. 830 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-1200>
- [71] *IRC5: Industrial Robot Controller* [online]. In: . ABB, 2019, s. 4 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/ridici-systemy/irc5c>
- [72] KEYENCE, . *Confocal Displacement Sensor - CL-3000 Series*. In: *YouTube* [online]. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=HhnCho-R2cc&t=20s&ab\\_channel=KEYENCECORPORATIONOFAMERICA](https://www.youtube.com/watch?v=HhnCho-R2cc&t=20s&ab_channel=KEYENCECORPORATIONOFAMERICA)
- [73] LEHTLA, TÕNU. *INTRODUCTION TO ROBOTICS* [online]. Tallinn, 2008 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: [http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR0040/01\\_Robotics.pdf](http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR0040/01_Robotics.pdf). Tallinn Technical University.
- [74] *Technical reference manual: RAPID overview* [online]. In: . VÄSTERÅS: ABB, 2018, s. 1804 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://abb.sluzba.cz/Pages/Public/IRC5UserDocumentationRW6/en/3HAC050917%20TRM%20RAPID%20RW%206-en.pdf>
- [75] KUBELA, Tomáš. *Introduction to Industrial Robotics: Robots and Manipulators GPZ*. Brno, 2019.
- [76] SVRČEK, Jan, Petr TŮMA, Tomáš MARTINEC, Jaroslav MLÝNEK a Roman KONBLOCH. *Metodika pro měření a eliminaci polohových chyb robota při 3D tisku: Projekt: Adaptivní technologie 3D tisku na bázi extrudéru pro přesnou a efektivní sériovou výrobu (TF06000085)* [online]. Liberec [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: [https://dSPACE.tul.cz/bitstream/handle/15240/156518/Vyzkumna\\_zprava\\_final.pdf?sequence=1](https://dSPACE.tul.cz/bitstream/handle/15240/156518/Vyzkumna_zprava_final.pdf?sequence=1). Výzkumná zpráva. Technická univerzita v Liberci.
- [77] Robot Calibration (Laser Tracker). In: *RoboDK* [online]. RoboDK Inc., 2021 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://robodk.com/doc/en/Robot-Calibration-LaserTracker.html>
- [78] JELÍNEK, Aleš a Adam CHROMÝ. *Vybrané partie z robotiky* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: [https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~robotika/Vybrane\\_partie\\_z\\_robotiky.pdf](https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~robotika/Vybrane_partie_z_robotiky.pdf). Učební text. Vysoké učení technické v Brně.
- [79] DIGIMATIC Digitální úchylkoměr ID-C 12mm, 0,001mm, ploché zadní víčko. In: *Mitutoyo* [online]. Teplice: Mitutoyo s.r.o. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs\\_CZ/mitutoyo/1300442458734/DIGIMATIC%20Digit%C3%A1ln%C3%AD%20%C3%BAchylkom%C4%9Br%20ID-C/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/543-390B/index.xhtml?jsessionid=0D74E8BBA82BC84D59B71A2388A9D440](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/1300442458734/DIGIMATIC%20Digit%C3%A1ln%C3%AD%20%C3%BAchylkom%C4%9Br%20ID-C/$catalogue/mitutoyoData/PR/543-390B/index.xhtml?jsessionid=0D74E8BBA82BC84D59B71A2388A9D440)

- [80] *IRB 1200: Kompaktní, flexibilní a rychlý malý průmyslový robot* [online].  
In: . Praha: ABB, 2017, s. 4 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z:  
<https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-1200>



## 13 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

### 13.1 Seznam tabulek

TAB 1) TECHNICKÉ PARAMETRY [70] .....	47
TAB 2) TECHNICKÉ PARAMETRY IRC5C COMPACT [71] .....	48
TAB 3) TECHNICKÉ PARAMETRY IRC5 CABINET [71].....	48
TAB 4) TECHNICKÉ PARAMETRY CL-P007 [40] [50] .....	51
TAB 5) TECHNICKÉ PARAMETRY CL-P030 [40] [50] .....	52
TAB 6) KABELÁŽ (PRODLUŽOVACÍ KABEL PRO SNÍMACÍ HLAVU) [40] [50] .....	53
TAB 7) PŘÍKLADY RYCHLOSTI [74] .....	57
TAB 8) ZÓNY [74] .....	58
TAB 9) VLIV ZMĚNY AKCELERACE NA ČAS SIMULACE.....	67
TAB 10) POJMY [70] .....	71
TAB 11) TYPY KALIBRACE [70] .....	71
TAB 12) POROVNÁNÍ HODNOT ACCSET DOTYKOVÉ A OPTICKÉ METODY .....	84

### 13.2 Seznam obrázků

OBR. 1) LOGO SPOLEČNOSTI ELVAC A.S. [1] .....	19
OBR. 2) ROBOT S DOTYKOVÝM SENZOREM GT2-P12 .....	21
OBR. 3) ROBOTICKÉ PRACOVISTĚ.....	23
OBR. 4) PRINCIP TRIANGULACE [11] .....	26
OBR. 5) PRINCIP STEREOVIDĚNÍ [12].....	27
OBR. 6) PRINCIP KONFOKÁLNÍHO MIKROSKOPU [16] .....	28
OBR. 7) MICHELSONŮV INTERFEROMETR [18] .....	29
OBR. 8) INTERFEROGRAM [22] .....	30
OBR. 9) KAMERY PRO STROJOVÉ VIDĚNÍ A) ŘÁDKOVÁ KAMERA; B) MATICOVÁ KAMERA [28] [30] .....	32
OBR. 10) LASER TARCKER SE SONDOU [32].....	33
OBR. 11) TEODOLIT [34].....	33
OBR. 12) DIGITÁLNÍ PROFILPROJEKTORY [36] [37]34OBR. 13) KONFOKÁLNÍ MIKROSKOP OLS5100 [38].....	34
OBR. 14) KONFOKÁLNÍ SENZOR A) MOŽNOST USPOŘÁDÁNÍ [41]; B) POPIS [40] .....	35
OBR. 15) A) KONFOKÁLNÍ SENZORY ŘADY IFS2406; B) MĚŘICÍ ROZSAH [44] [45].....	36
OBR. 16) A) KONFOKÁLNÍ SENZORY ŘADA ZW; B) MĚŘICÍ ROZSAH [48] [49] .....	36

OBR. 17) A) MĚŘICÍ ROZSAH; B) KONFOKÁLNÍ SENZORY ŘADY CL-3000 [52] [53].....	37
OBR. 18) MĚŘENÍ POMOCÍ TRIANGULAČNÍHO LASEROVÉHO SENZORU [54] .....	37
OBR. 19) KALIBRAČNÍ MŘÍŽKY [59].....	39
OBR. 20) UNIVERZÁLNÍ KALIBRAČNÍ TABULKA [61] .....	40
OBR. 21) SCHÉMA PRACOVNÍHO PROSTORU MĚŘICÍ APLIKACE .....	45
OBR. 22) OSY ROBOTU [70].....	46
OBR. 23) ŘÍDICÍ JEDNOTKA.....	47
OBR. 24) KONCOVÝ EFEKTOR.....	48
OBR.25) SENZORY A) CL-P007; B) CL-P030 [50] .....	49
OBR. 26) SNÍMACÍ HLAVA SENZORU – MĚŘENÍ PRŮHLEDNÉHO POVRCHU [40] .....	49
OBR. 27) SESTAVA ŘÍDICÍ JEDNOTKY A OPTICKÉ JEDNOTKY [72] .....	50
OBR. 28) SOFTWARE A) CL-NAVIGATERN; B) EXPORT DO APLIKACE EXCEL .....	50
OBR. 29) VÍCEBODOVÉ MĚŘENÍ TLOUŠŤKY [40].....	51
OBR. 30) TESTOVACÍ DÍL.....	53
OBR. 31) SOUŘADNÝ SYSTÉM [73].....	56
OBR. 32) DEFINOVANÍ ZÓNY [74] .....	57
OBR. 33) PŘÍKLADY AKCELERACE [74] .....	58
OBR. 34) KONFIGURACE A) ROTAČNÍCH OS; B) LINEÁRNÍCH OS [74] .....	59
OBR. 35) TYPY POHYBŮ [75].....	60
OBR. 36) APROXIMACE POHYBŮ [26] .....	60
OBR. 37) VLOŽENÍ FRAME .....	61
OBR. 38) VÝBĚR TCP BODU.....	61
OBR. 39) VLOŽENÍ NÁSTROJE NA ROBOT .....	62
OBR. 40) VLOŽENÍ PŘÍPRAVKŮ: A) VYTVOŘENÍ DESKY; B) VYTVOŘENÍ KALIBRAČNÍCH ZNAČEK .....	62
OBR. 41) VYTVOŘENÍ SKUPINY.....	63
OBR. 42) VYTVOŘENÍ WORKOBJECTU.....	63
OBR. 43) PŘIPRAVENÉ PRACOVNÍŠTĚ.....	64
OBR. 44) A) VYTVOŘENÍ TARGET; B) ÚPRAVA TARGETŮ.....	64
OBR. 45) KALIBRAČNÍ ZNAČKY S DEFINOVANÝMI BODY.....	65
OBR. 46) VYTVOŘENÍ EMPTY PATH .....	65
OBR. 47) AUTO PATH: A) KALIBRACE, B) PŘÍKLAD VARIANTY MĚŘENÍ .....	66
OBR. 48) ZMĚNA KONFIGURACE V BODĚ.....	66
OBR. 49) ZADANÝ SAMOSTATNÝ BOD .....	68
OBR. 50) INSTRUKCE BODU .....	68
OBR. 51) UKÁZKA MAIN STRUKTURY .....	68
OBR. 52) ROZLOŽENÍ BODŮ VE VARIANTĚ 1.....	68
OBR. 53) ROZLOŽENÍ BODŮ VE VARIANTĚ 2.....	69
OBR. 54) ROZLOŽENÍ BODŮ VE VARIANTĚ 3.....	69
OBR. 55) SIGNÁLY SIMULACE .....	70
OBR. 56) KALIBRAČNÍ ZNAČKY [70] .....	72

OBR. 57) A) OTVORY PRO KALIBRAČNÍ NÁSTROJ NA OSÁCH 4-6; B) KALIBRAČNÍ NÁSTROJ; C) KALIBRACE POMOCÍ KALIBRAČNÍHO NÁSTROJE PRO OSU 4 .....	72
OBR. 58) KALIBRACE POČÍTADLA OTÁČEK .....	73
OBR. 59) KALIBRACE ROBOTU POMOCÍ LASER TRACKERU [77] .....	74
OBR. 60) NÁJEZDY ROBOTU NA KALIBRAČNÍ ZNAČKY .....	75
OBR. 61) DOBRÁ (VYHOVUJÍCÍ) PŘESNOST [78] .....	77
OBR. 62) DOBRÁ (VYHOVUJÍCÍ) OPAKOVATELNOST [78] .....	77
OBR. 63) DOBRÁ (VYHOVUJÍCÍ) PŘESNOST A OPAKOVATELNOST [78] .....	77
OBR. 64) PŘÍKLAD KONTROLY POMOCÍ DVOJICE KAMER .....	79
OBR. 65) ÚCHYLKOMĚR [79] .....	79
OBR. 66) PŘÍKLAD MĚŘENÍ OPAKOVATELNOSTI: VARIANTA 1 .....	80
OBR. 67) PŘÍKLAD MĚŘENÍ OPAKOVATELNOSTI: VARIANTA 2 .....	80



## 14 SEZNAM PŘÍLOH

Parametry senzoru GT2-P12

Parametry robotu IRB 1200-5/0,9

Rozměry konfokálního senzoru CL-P030

Výkres testovacího dílu

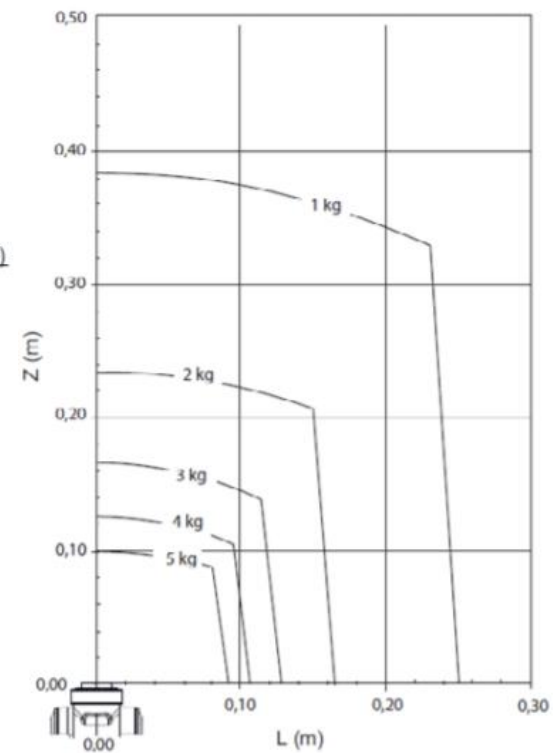
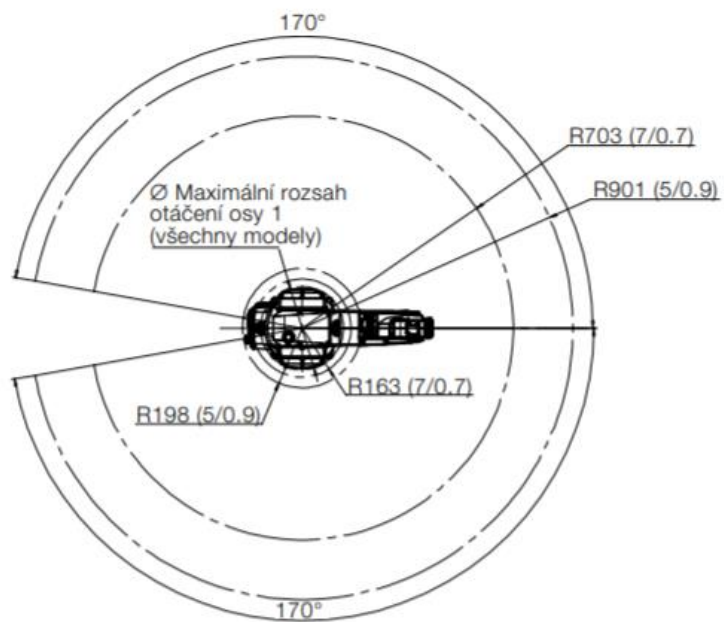
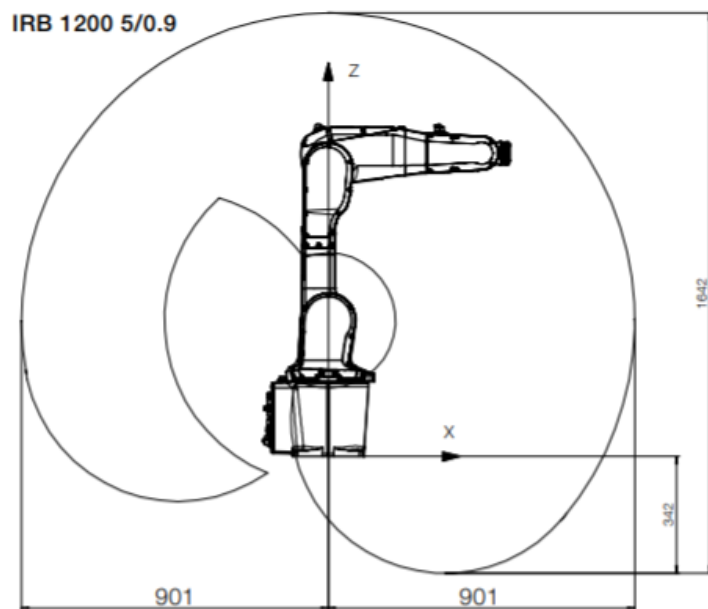


# PŘÍLOHY

## Parametry senzoru GT2-P12 [2]

<b>Detekční systém</b>		Scale Shot Syssem II
<b>Měřicí rozsah</b>		12 mm
<b>Rozlišení</b>		0,5 µm
<b>Udávaná přesnost</b>		2 µm (P-P)
<b>Síla měření</b>	<b>Montáž směrem dolů</b>	1,0 N
	<b>Boční montáž</b>	0,95 N
	<b>Montáž směrem nahoru</b>	0,9 N
<b>Cyklus vzorkování</b>		4 ms
<b>Mechanická odezva</b>		10 Hz
<b>Provozní kontrolka</b>		2-barevná LED (červená, zelená)
<b>Odolnost vůči prostředí</b>	<b>Stupeň krytí</b>	IP67G (JIS) IP67 (IEC) NEMÁ typ 13
	<b>Okolní teplota</b>	-10 až 55 °C
	<b>Relativní vlhkost</b>	35 až 85 %
	<b>Vibrace</b>	10 až 55 Hz dvojitá amplituda, 1,5 mm ve směru osy X, Y, Z, 2 hodiny
	<b>Odolnost vůči nárazu</b>	100 m/s <sup>2</sup>
<b>Materiály;</b>	<b>Hlavní tělo</b>	Pouzdro hlavního těla SUS303, stavový indikátor: PET, kabel mezi senzorovou hlavou a konektorem relé: PUR, konektor relé: PBT
	<b>Protiprachová manžeta</b>	NBR
	<b>Kontakt</b>	SUS304, SUS440C
<b>Kabel senzorové hlavy</b>		Volitelně
<b>Hmotnost (bez kabelu)</b>		Cca 35 g

## Parametry robotu IRB 1200-5/0,9 [80]



IRB 1200 5/0.9 Nosnost



## Rozměry konfokálního senzoru CL-P030 [50]

